

doi:10.3788/gzxb20174612.1216001

基于十字变形结构的高效超宽带线性极化转换超表面

方振华, 罗春荣, 赵晓鹏

(西北工业大学 理学院 智能材料实验室, 西安 710129)

摘 要:提出了一种基于十字变形结构超表面的极化转换器,在反射模式下获得了高效超宽带的交叉极化反射.在 8.4 到 20.7 GHz 频段内交叉极化反射率大于 -0.2 dB,而共极化反射率小于 -12 dB,在谐振频率点处交叉极化反射率大于 -0.03 dB,而共极化反射率达到 -60 dB,即在谐振点处几乎可实现完全的交叉极化转换;相对带宽达 84.5%,交叉极化的平均转换效率为 96.7%;此外,利用电路板刻蚀制备了此极化转换器样品,实验测试其交叉极化反射率在工作频段内大于 -1 dB,而共极化反射率小于 -10 dB,实验结果与模拟结果吻合,验证了此超表面可以在超宽的频带内实现线极化电磁波的交叉极化转换.本文设计的超宽带极化转换超表面具有转换效率高和几何结构简单的优点,可被扩展到太赫兹甚至是可见光频段.

关键词:电磁波;交叉极化转换;反射;超表面;超宽带

中图分类号:O441.4; O441.6

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)12-1216001-6

Efficient Ultrawideband Linear Polarization Conversion Based on Cross-shaped Structure Metasurface

FANG Zhen-hua, LUO Chun-rong, ZHAO Xiao-peng

(Smart Materials Lab, School of Natural and Applied Sciences, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: A polarization converter that uses metasurfaces composed of cross deformable structure is proposed. Ultrawideband 90° polarization rotation is obtained in the reflective mode. Reflectance of the cross-polarized wave is above -0.2 dB while co-polarization wave is blow -12 dB in range of 8.4-20.7 GHz. The cross-polarized reflectance is greater than -0.03 dB at the resonant frequency points, and the co-polarized reflectance reaches -60 dB. That is, almost complete cross-polarization conversion be achieved at the resonance frequency points. The relative bandwidth is 84.5% with average orthogonal polarization conversion ratio (PCR) of 96.7%. In addition, the metasurface polarization converter is fabricated on FT5880 substrate. The experimental results show that the cross-polarized reflectance is greater than -1 dB in the operating frequency band and the co-polarized reflectivity is less than -10 dB. The experimental results are in good agreement with the simulation results, which verifies that the metasurface can realize the cross-polarization conversion of the linearly polarized electromagnetic wave in the ultra-wide frequency band. The ultrawideband conversion metasurface has the advantages of high conversion efficiency and simple geometric structure. The similar model can be extended to terahertz or even visible light.

Key words: Electromagnetic wave; Cross polarization conversion; Reflection; Metasurface;

基金项目:国家重点基础研究发展计划(No.2012CB921503),国家自然科学基金(Nos.51272215,11674267)资助

第一作者:方振华(1986—),男,博士研究生,主要研究方向为光学超表面.Email:leaf@mail.nwpu.edu.cn

导 师:罗春荣(1954—),女,教授,博士生导师,主要研究方向为智能材料.Email:luocr@nwpu.edu.cn

通讯作者:赵晓鹏(1957—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为智能材料与结构、声学及光学超表面等.Email:xpzha@nwpu.edu.cn

收稿日期:2017-09-11; **录用日期:**2017-09-28

<http://www.photon.ac.cn>

Ultrawideband

OCIS Codes: 130.5440; 230.5440; 240.5420

0 引言

电磁波的极化态反映了电磁波在传播过程中的振动方向相对于其传播方向的不对称性^[1].由于电磁波的许多奇异现象均与电磁波的极化态有关^[2-3],因此控制电磁波的极化态是科学研究中的一个重要方向.传统的极化转换设备大多是通过法拉第效应^[4]、扭曲向列项的液晶双折射晶体来实现的,但是这些传统方法均面临设备尺寸较大、强度差及易老化等缺点^[5-7],因此限制了它们的进一步应用.

超材料作为一种人工组装机材料,具有许多自然材料不具备的新奇特性^[8-13].其中最具代表性的是一种被称为超表面的二维超材料,它既保留了三维超材料的奇异特性,又克服了三维超材料在制备上所面临的困难^[14-16].超表面在操控电磁波传播方面表现出了非凡的特性^[17-21],尤其在微波段和光频段,基于各向异性或者手性超表面的极化操控研究已经取得了较大的进展^[22-26].但是现有的方法仍然存在转换效率低和工作带宽较窄的问题,因此限制了它们进一步实际应用.为了拓宽极化转换器的工作带宽,研究人员提出了许多新奇的方法,比如利用开口谐振环获得高效的宽带极化转换.此外,Gansel等^[27]利用螺旋光学超材料设计了一种近红外频段的宽带圆极化器,其有效工作波段能够覆盖微波到太赫兹波段,但是该器件的转换效率较低.Carl Pfeiffer等^[28]提出多层结构可以提高超表面的工作效率,然而这又不可避免地会增大样品的体积.余积宝等^[29]提出的开口椭圆环极化旋转超表面在超宽带范围内转换效率均大于85%,Gao等^[30]提出的双V结构超表面的平均转换效率能够达到90%.通过二维超表面实现更高效的极化旋转仍是目前研究极化态操控主要发展方向.

本文利用一种简单的十字变形结构设计了超宽带的线性极化转换超表面.该超表面可以将一个线极化波的极化方向旋转 90° .并且还可以有效地拓宽反射波的交叉极化旋转带宽,数值模拟和实验测试结果都证实了这种极化转换器可以在8.4到20.7 GHz的超宽频带内将一个线极化波的极化方向偏转 90° ,同时保持转换效率大于92%,并且平均转换效率为96.7%.对比其他的极化转换器,它的结构更简单并且厚度更薄,因此易于融合到相关的应用设备中.

1 设计与仿真

反射模式的超表面极化转换器效率较高,通常为多层结构,其中包括顶层超表面、中介质层以及金属背板.超表面由周期性排列的单元结构组成.由于其结构单元是非对称的,因此该超表面可以看作是一种具有分散的介电常数与磁导率各向异性材料.当一束线极化平面波入射到超表面时,具有各向异性的超表面会同时产生 x 方向与 y 方向极化的反射与透射波.超表面与金属背板间的介质层中形成法布里-珀罗(Fabry-Perot)谐振腔^[31-32],透射波在谐振腔中多次反射,再经过相互干涉形成最后的反射波.介质层与金属背板增加了控制反射波振幅与相位的设计自由度,因此通过优化介质层来提升从这三层结构得到的各向异性反射波的带宽,也就是说通过调整超表面的分散特性和不共极化态部分的干涉,就可以控制反射波的极化态.

基于以上原理,设计的十字变形超表面结构单元元形貌示意图如图1.电介质层的厚度是设计的关键,因为它在多重反射过程中决定了最终反射波的相位. l_1 与 l_2 分别为十字的长杆与短杆,在十字结构的中心结合一个半径为 r 的圆.通过对该结构的参数优化,得到一个超宽的工作频带.经过优化后的十字变形结构参数为:杆长 $l_1=11$ mm, $l_2=4.2$ mm;杆宽 $w=0.7$ mm;圆半径 $r=2$ mm.电介质层选用RT5880环氧板,其电导率为 2.65×10^7 S/m,损耗角正切为0.003,厚度 $d=3$ mm.

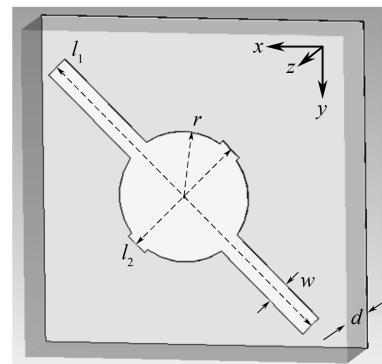


图1 超表面的基本单元结构

Fig.1 Schematic of the proposed metasurface unit

为了更好地理解超表面的反射行为,把入射平面波的 y 方向极化分成两部分 \mathbf{u} 和 \mathbf{v} ,如图 2(a).入射的电磁波可以表示为

$$\mathbf{E}_i = \mathbf{u} E_{iu} \exp(j\phi) + \mathbf{v} E_{iv} \exp(j\phi)$$

反射波可以表示为

$$\mathbf{E}_r = \mathbf{u} E_{ru} + \mathbf{v} E_{rv} = \mathbf{u} r_u E_{iu} \exp(j\phi) + \mathbf{v} r_v E_{iv} \exp(j\phi),$$

式中 r_u 和 r_v 分别为电磁波在 \mathbf{u} 和 \mathbf{v} 方向的反射效率.由于超表面的各向异性,当 $r_u \approx r_v$ 且两者相位差 $\Delta\phi \approx 180^\circ$ 时,合成的 E_r 方向为 x 轴方向,因此获得了一个 90° 的极化旋转.通过数值模拟得到的该转换器的反射波沿 \mathbf{u} 与 \mathbf{v} 方向的振幅与相位差如图 2(b),点划线与短划线分别表示两方向上的振幅,实线表示两者相位差.反射波沿 \mathbf{u} 方向与 \mathbf{v} 方向的振幅基本相等,在 8.4 到 20.7 GHz 范围内相位差接近 180° .图中虚线表示相位差等于 180° 的直线,与相位差曲线有四个交点,这四个交点对应的频率分别为 8.96 GHz、14.3 GHz、19.3 GHz 与 20.84 GHz,即在这些谐振点处 $\Delta\phi = 180^\circ$,可以实现完全的垂直极化旋转.当入射波极化方向沿 \mathbf{u} 或 \mathbf{v} 方向时,此时只在 \mathbf{u} 或 \mathbf{v} 方向有谐振响应,其反射波极化方向与入射波相同,无极化旋转.当入射波极化方向为其余任意方向时,由于在 \mathbf{u} 和 \mathbf{v} 方向的谐振波振幅与相位不同,叠加得到的反射波的极化方向旋转极为有限.该转换器可以在 8.4 到 20.7 GHz 的超宽带范围内实现对 y 方向线极化入射波的交叉极化转换.

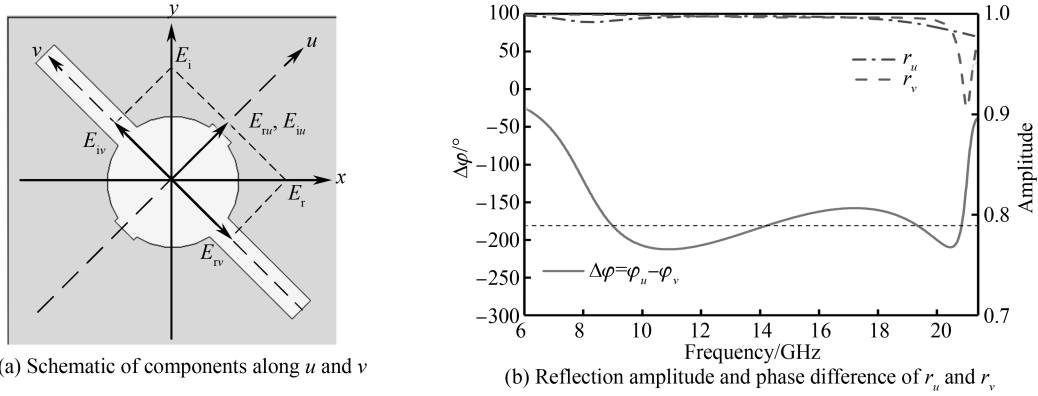


图 2 超表面在 \mathbf{u} 与 \mathbf{v} 方向极化旋转

Fig.2 Schematic of components along \mathbf{u} and \mathbf{v}

定义 $\eta_{yy} = E_{yr}/E_{yi}$, $\eta_{xy} = E_{xr}/E_{yi}$ 表示不同极化转换的反射效率, E 表示电场,下标 i 与 r 分别表示入射与反射电磁波, x 与 y 表示电磁波的极化方向.采用 CST Microwave Studio 软件对设计的极化转换器的共极化反射效率 η_{yy} 与交叉极化反射效率 η_{xy} 进行模拟.在模拟过程中,单元结构沿 x 轴与 y 轴设置成周期性边界条件,入射电磁波为平面波,电极化方向沿 y 轴方向.得到的反射率及转化效率如图 3,图 3(a)中实线表示交叉极化反射率,在其工作频带内,反射率大于 -0.2 dB;虚线表示共极化反射率,在相同频段内反射率很小;在 8.96 GHz、14.3 GHz、19.3 GHz 与 20.84 GHz 四个谐振点处,交叉极化反射率大于 -0.03 dB,而共极化

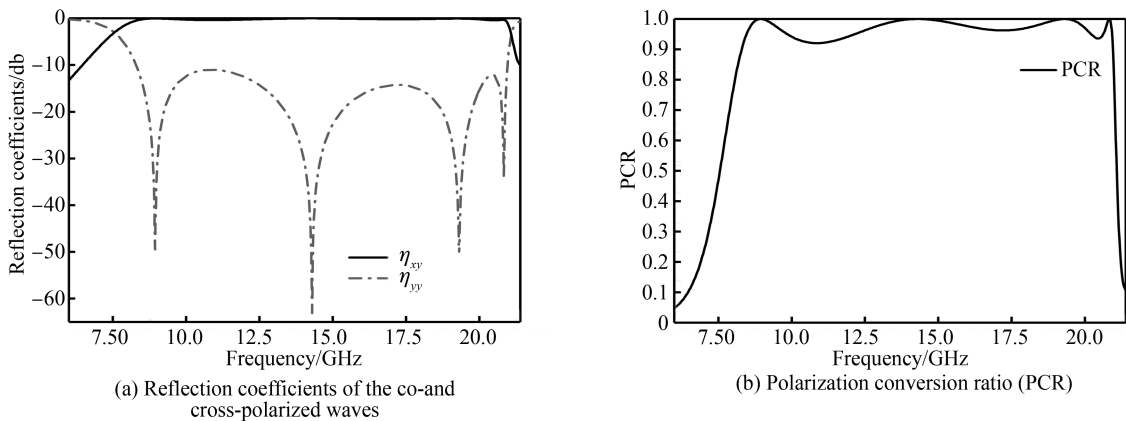


图 3 反射率与极化转换效率

Fig.3 Reflection coefficients and Polarization conversion ratio

反射率可达 -60 dB. 图 3(b) 为极化旋转超表面的极化旋转效率 (Polarization Conversion Ratio, PCR), $PCR = \eta_{xy}^2 / (\eta_{xy}^2 + \eta_{yy}^2)$. 在工作频段 8.4 GHz 到 20.7 GHz 范围内, 转换率大于 92% , 并且谐振点处的转化率接近于 1.

谐振点附近的单元结构与金属背板的表面电流分布如图 4, 在谐振点处, 单元结构表面电流的方向在长杆的端点位置发生改变, 表面电流沿长杆对称平行分布, 其总电流方向在图 4 中用大箭头表示. 图 4(a) 与 (b) 表示, 在 8.96 GHz 与 14.3 GHz 两个谐振点处, 单元结构的表面电流方向相同; 图 4(c) 与 (d) 表示, 在 19.3 GHz 与 20.84 GHz 两个谐振点处, 单元结构的表面电流方向也相同. 沿单元结构边缘平行分布的表面电流使得单元结构等效为一个电偶极子, 同时单元结构的表面电流在金属背板的表面形成感应电流, 谐振点处的谐振类型可以通过感应电流的方向来确定. 金属背板感应电流的方向始终与单元结构表面电流方向相反, 因此在电介质基板中会形成一个电流环, 即在四个谐振点处都构成一个等效磁谐振器.

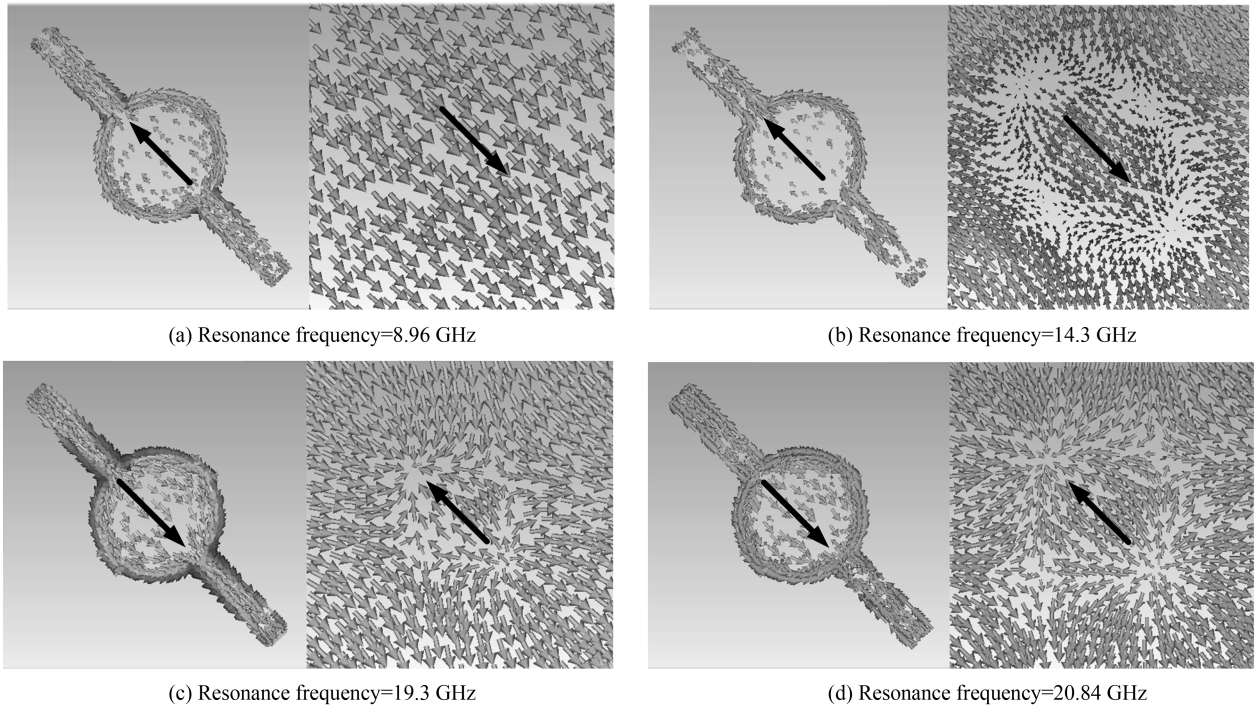


图 4 超表面单元结构与背板在谐振点处的表面电流分布

Fig. 4 Surface current distributions on the metasurface unit cell and metallic ground sheet at resonance frequencies

2 实验验证

为了实验验证所设计的极化转换器, 根据这一模型在 RT5880 基底上制备了样品. 样品单元的结构参数与图 1(a) 保持一致, 整个样品为 300×300 mm 的正方形, 共包含 30×30 个单元结构, 如图 5(a). 在微波暗室中对样品进行测试, 测试系统示意图如图 5(b), 将工作频段为 3 GHz~ 22 GHz 的两个宽带喇叭连接到矢量网络分析仪上, 喇叭 1 与 2 之间形成一个 5° 的夹角. 将样品放置于喇叭前方, 周围围绕吸波材料, 并保持样品与喇叭的中心在同一高度. 由喇叭 1 发出的垂直极化波入射到样品表面, 经转换器反射后, 利用喇叭 2 分别接收反射的垂直极化波与平行极化波. 计算可得相应的交叉极化与共极化反射效率.

图 5(c) 为实验测试和数值模拟的对比结果, 实验结果与模拟结果基本吻合. 从共极化反射效率的实验曲线中可以发现 3 个谐振频率点, 且谐振频率点处的反射效率均低于 -10 dB, 但是对应频率点的交叉极化反射率接近于 0 dB, 因此实验证实了所设计的极化转换超表面可以在一个超宽的频带内 (8.4 到 20.7 GHz) 有效地将电磁波从 y 极化转换为 x 极化. 第四个谐振点处的实验结果与模拟结果有一定偏差, 同时实验测得谐振频率和振幅与模拟结果在非谐振点处略有出入, 主要是由于在模拟过程中, 周期性边界条件使得样品沿 x 与 y 方向无限延伸, 而实际制备的样品尺寸有限. 插入损耗 (Insertion Loss, IL) 指在传输系统的某处由于元件或器件的插入而发生的负载功率的损耗, 本文两个测量端口采用相同的基准阻抗, 插入损耗为

$$IL = -20\log(\eta_{xy})^{[33-34]}$$

得到此极化旋转超表面的插入损耗模拟及实验曲线如图 5(d),在超表面工作带宽内,插入损耗模拟值小于 0.5 dB,谐振点处插入损耗实验值与模拟值一致,实验值在 8.4 到 16 GHz 范围内小于 1.5 dB,在其余区域实验值大于模拟值,在 17 到 20 GHz 范围内更为明显.样品制备误差以及测量时两个喇叭之间的微小角度均会导致实验测量值与模拟值存在一定的差异.

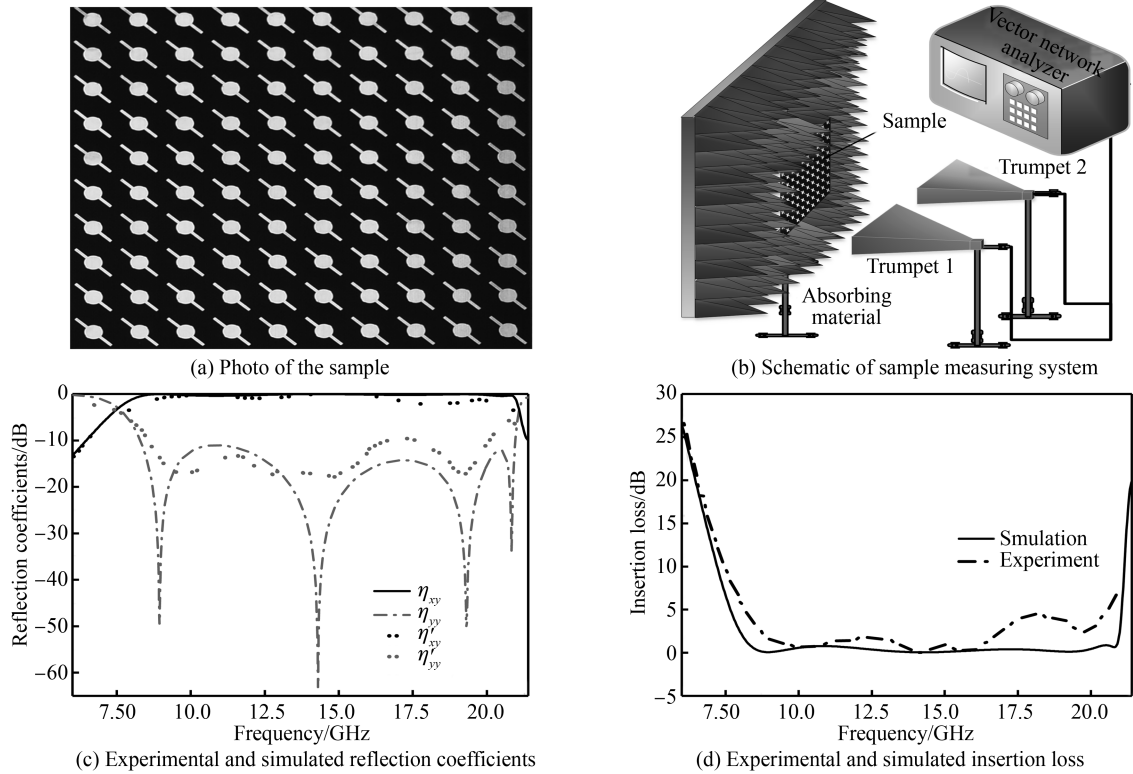


图 5 实验样品及测量

Fig.5 Experimental sample and measurement

3 结论

设计并制备了一种基于十字变形结构的反射式超表面极化转换器,数值模拟和实验测试证实,该结构可在 8.4~20.7 GHz 的超宽频段内将 $x(y)$ 极化波转换为 $y(x)$ 极化波,相对带宽达到 84.5%,并且在工作频段内其转换效率超过了 92%,平均转换效率为 96.7%,且在谐振点处几乎可实现完全的交叉极化转换.这种超表面在通讯、微纳装置等众多领域中有着广阔的应用前景.此外,这种结构简单的超表面设计方法可以被拓展到太赫兹以及光频段.

参考文献

- [1] BERUETE M, NAVARRO-C A M, SOROLLA M, *et al.* Polarization selection with stacked hole array metamaterial [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, **103**(5): 053102.
- [2] XU Kun, WU Jian, HONG Xiao-bing, *et al.* Two different operation regimes of fiber laser based on nonlinear polarization rotation: passive mode-locking and multiwavelength emission [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(12): 979-981.
- [3] SUN Wu-jiong, HE Qiong, HAO Jia-ming, *et al.* A transparent metamaterial to manipulate electromagnetic wave polarizations [J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(6): 927-929.
- [4] MEISSNER T, WENTZ F, Polarization rotation and the third Stokes parameter: The effects of spacecraft attitude and Faraday rotation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, **44**(3): 506-515.
- [5] XU J, LI T, LU F, *et al.* Manipulating optical polarization by stereo plasmonic structure [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(2): 748-756.
- [6] SHI J, MA H, JIANG W, *et al.* Multiband stereometamaterial-based polarization spectral filter [J]. *Physical Review B*, 2012, **86**(3): 035103.
- [7] GAO Juan-juan, LI Xia, GAO Song, *et al.* High power mid-infrared supercontinuum generation in silica photonic crystal

- fiber[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(2): 225-230.
- 高娟娟,李夏,高松,等. 石英光子晶体光纤中高功率中红外超连续谱的产生[J]. *发光学报*, 2015, **36**(2): 225-230.
- [8] SCHURIG D, MOCK J, JUSTICE B, *et al.* Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. *Science*, 2006, **314**(5801): 977-980.
- [9] PENDRY J, Negative refraction makes a perfect lens[J]. *Physical Review Letters*, 2000, **85**(18): 3966.
- [10] SMITH D, PADILLA W, VIER D, *et al.* Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. *Physical Review Letters*, 2000, **84**(18): 4184-4187.
- [11] LIU Bao-qi, ZHAO Xiao-peng, ZHU Wei-ren, *et al.* Multiple pass-band optical left-handed metamaterials based on random dendritic cells[J]. *Advanced Functional Materials*, 2008, **18**(21): 3523-3528.
- [12] ZHOU Xin, ZHAO Xiao-peng, LIU Yu, Disorder effects of left-handed metamaterials with unitary dendritic structure cell[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(11): 7674-7679.
- [13] GONG Bo-yi, ZHAO Xiao-peng, PAN Zhen-zhen, *et al.* A visible metamaterial fabricated by self-assembly method[J]. *Scientific Reports*, 2014, **4**: 04713.
- [14] YU N, GENEVET P, KATS M, *et al.* Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 2011, **334**(6054): 333-337.
- [15] NI Xing-jie, EMANI N, KILDISHEV A, *et al.* Broadband Light bending with plasmonic nanoantennas[J]. *Science*, 2012, **335**(6067): 427-427.
- [16] SHI Xiao-qiang, GONG Qiao-xia, DUAN Zhi-yong, *et al.* Design and characteristics of a broad-band metamaterial absorber[J]. *Acta photonica Sinica*, 2013, **42**(4): 405-408.
- 师小强,弓巧侠,段智勇,等. 一种宽频带超材料吸波体的设计及其特性[J]. *光子学报*, 2013, **42**(4): 405-408.
- [17] CHENG Qiang, CUI Tie-jun, Negative refractions in uniaxially anisotropic chiral media[J]. *Physical Review B*, 2006, **73**(11): 113104.
- [18] XU He-xiu, WANG Guang-ming, QI Mei-qing, *et al.* Compact dual-band circular polarizer using twisted Hilbert-shaped chiral metamaterial[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(21): 24912-24921.
- [19] PENDRY J, SCHURIG D, SMITH D, Controlling electromagnetic fields[J]. *Science*, 2006, **312**(5781): 1780-1782.
- [20] FANG Zhen-hua, CHEN Huan, YANG Fa-sheng, *et al.* Slowing down light using a dendritic cell cluster metasurface waveguide[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 37856.
- [21] ZHAO Wei, ZHAO Xiao-peng. Relationship of surface plasmon polaritons and nanoparticles morphology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(4): 556-560.
- 赵伟,赵晓鹏. 纳米粒子形貌与表面等离子体激元关系[J]. *光子学报*, 2011, **40**(4): 556-560.
- [22] WU Shan, ZHANG Zhao, ZHANG Yi, *et al.* Enhanced rotation of the polarization of a light beam transmitted through a silver film with an array of perforated S-shaped holes[J]. *Physical Review Letters*, 2013, **110**(20): 207401.
- [23] MA Xiao-liang, HUANG Cheng, PU Ming-bo, *et al.* Multi-band circular polarizer using planar spiral metamaterial structure[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(14): 16050-16058.
- [24] GRADY N, HEYES J, CHOWDHURY D, *et al.* Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction[J]. *Science*, 2013, **340**(6138): 1304-1307.
- [25] CHIN J, GOLLUB J, MOCK J, *et al.* An efficient broadband metamaterial wave retarder[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(9): 7640-7647.
- [26] HAN Jiang-feng, CAO Xiang-yu, GAO Jun, *et al.* Design of broadband reflective 90° polarization rotator based on metamaterial[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, **65**(4): 044201.
- 韩江枫,曹祥玉,高军,等. 一种基于超材料的宽带,反射型 90°极化旋转体设计[J]. *物理学报*, 2016, **65**(4): 044201.
- [27] GANSEL J, THIEL M, RILL M, *et al.* Gold helix photonic metamaterial as broadband circular polarizer[J]. *Science*, 2009, **325**(5947): 1513-1515.
- [28] PFEIFFER C, GRBIC A, Millimeter-wave transmitarrays for wavefront and polarization control [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2013, **61**(12): 4407-4417.
- [29] YU Ji-bao, MA Hua, WANG Jia-fu, *et al.* High-efficiency ultra-wideband polarization conversion metasurfaces based on split elliptical ring resonators[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(17): 178101.
- 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): 178101.
- [30] GAO Xi, HAN Xu, CAO Wei-ping, *et al.* Ultrawideband and high-efficiency linear polarization converter based on double V-shaped metasurface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, **63**(8): 3522-3530.
- [31] GIBBS H, MCCALL S, VENKATESAN T, Differential gain and bistability using a sodium-filled Fabry-Perot interferometer[J]. *Physical Review Letters*, 1976, **36**(19): 1135-1138.
- [32] LANG Wen-jie, BOCKRATH Marc, BOZOVIC Dolores, *et al.* Fabry-Perot interference in a nanotube electron waveguide[J]. *Nature*, 2001, **411**(6838): 665-669.
- [33] COLLIN R E. Foundations for microwave engineering[M]. John Wiley & Sons, 2007.
- [34] POZAR D. Microwave engineering[M]. John Wiley & Sons, 2009.