

基于 L 形超材料的太赫兹宽带偏振转换器

周璐, 赵国忠, 李永花

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 L 形微结构单元阵列的太赫兹波段宽带反射式偏振转换器, 数值分析了由 L 形微结构单元阵列超材料、电介质层和金属板组成的偏振转换器的特性。结果表明, 所提偏振转换器可以将线偏振波转换为交叉偏振波, 还可以在两个特殊频率下将线偏振波转换成圆偏振波。在 0.64~1.19 THz 的频率范围内, 可以实现大于 80% 转换率的偏振转换, 最大偏振转换率达到 95% 以上。此外, 在一定的斜入射条件下, 所提偏振转换器可以保持良好的偏振转换性能。

关键词 材料; 太赫兹; 宽带; 偏振转换; L 形

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP55.041602

Broadband Terahertz Polarization Converter Based on L-Shaped Metamaterial

Zhou Lu, Zhao Guozhong, Li Yonghua

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

Abstract A broadband reflection polarization converter in the terahertz frequency regime is proposed based on the L-shaped microstructured cell arrays. The characteristics of this polarization converter composed of L-shaped microstructured cell array, dielectric layer, and metal plates are numerically analyzed. The results demonstrate that the proposed polarization converter can not only convert a linearly polarized (LP) wave into a cross-polarized wave, but also convert LP waves into circularly polarized (CP) waves at two specific frequencies. In the frequency range of 0.64-1.19 THz, the polarization conversion ratio (PCR) is more than 80%, and the maximum PCR is more than 95%. In addition, the proposed converter can maintain a good polarization conversion performance under certain oblique incidence conditions.

Key words materials; terahertz; broadband; polarization conversion; L shape

OCIS codes 160.3918; 260.5430; 300.6495

1 引言

近年来, 太赫兹技术飞速发展, 在成像^[1]、传感^[2]和通信^[3]等领域得到广泛的应用。高性能的太赫兹组件是实现太赫兹波操纵的关键, 如偏振器、衰减器、开关、相移器和调制器等^[4]。偏振调制是操

纵太赫兹波的一个重要方面, 传统的偏振器用天然双折射材料制成, 具有有限的操作带宽^[5]。因此, 作为一种基于人造复合材料的超材料引起了学者们极大的兴趣^[6]。目前, 已经通过设计不同的超材料微结构实现了多种高效太赫兹偏振转换器, 可用于不同偏振状态之间的转换。例如, 将线偏振波转换为

收稿日期: 2017-10-25; **收到修改稿日期:** 2017-11-01

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

作者简介: 周璐(1993—), 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: 18811444213@163.com

导师简介: 赵国忠(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 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)

交叉偏振的线偏振波^[7-12],将线偏振波转换为圆偏振波^[13-14],或是将左(右)旋圆偏振波转换为右(左)旋圆偏振波^[15]。与传统偏振器件相比,基于超材料的偏振转换器具有工作带宽较宽、偏振转换效率高以及可小型化等优点。Yong等^[16]提出了一种反射式超宽带偏振转换器,在0.53~1.36 THz的范围内将线偏振波转换为交叉偏振的线偏振波,但偏振转换率仅大于50%,转换效率相对较低。Li等^[17]提出了一种Z形反射式偏振转换器,在0.116~0.26 THz的范围内实现了线偏振波向交叉偏振线偏振波的转换,转换率大于80%,但工作带宽很窄。本文提出了一种基于L形微结构单元阵列的太赫兹波段宽带反射式偏振转换器,在太赫兹波段实现了高效率的偏振转换,且在一定斜入射条件下,该偏振转换器仍能保持良好的偏振转换性能。该研究结果为利用超材料实现太赫兹偏振转换提供了参考。

2 偏振转换器的结构设计

所设计的偏振转换器的结构单元如图1所示。此结构包括三层:表层为多个L形的金属结构,金属为银,其厚度 $d_1=0.2\ \mu\text{m}$;中介质层为聚酰亚胺,介电常数为3.5,其厚度 $t=35\ \mu\text{m}$;底层为金属板,金属为银,厚度 $d_1=0.2\ \mu\text{m}$ 。图1(b)所示为其正视图,多个L形金属结构的参数如下:臂长 $L=65\ \mu\text{m}$,宽度 $w=9\ \mu\text{m}$,间距 $d=3\ \mu\text{m}$,周期 $p=150\ \mu\text{m}$ 。采用CST MICROWAVE STUDIO软件进行数值模拟,分析偏振转换器的反射特性。在模拟中,对结构单元采用周期性边界条件,采用 x 偏振波垂直于结构入射。

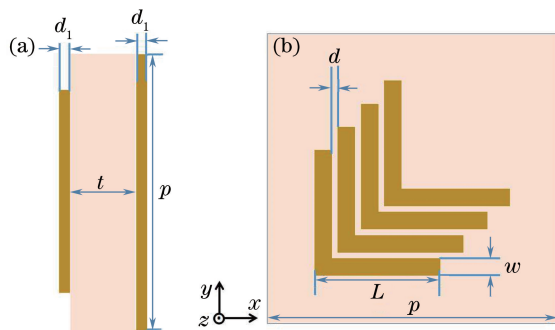


图1 基于超材料的偏振转换器的结构单元。

(a)侧视图;(b)正视图

Fig. 1 Unit cell of polarization converter based on metamaterial. (a) Side view; (b) front view

为了更好地理解偏振转换,将 x 至 x 和 x 至 y

偏振转换的反射系数分别定义为

$$r_{xx} = \left| \frac{E_{xr}}{E_{xi}} \right|, r_{yx} = \left| \frac{E_{yr}}{E_{xi}} \right|, \quad (1)$$

式中 E_{xx} 和 E_{xi} 分别表示偏振方向沿着 x 轴的反射太赫兹波和入射太赫兹波的振幅, E_{yr} 表示偏振方向沿着 y 轴的反射太赫兹波的振幅。对于线偏振转换,偏振转换率(PCR)为

$$P_{\text{PCR}} = \frac{r_{yx}^2}{r_{yx}^2 + r_{xx}^2}, \quad (2)$$

式中 r_{xx} 和 r_{yx} 分别表示共偏振反射系数和交叉偏振反射系数。反射电磁波的 y 分量和 x 分量之间的相位差为

$$\Delta\varphi_{yx} = \arg(r_{yx}) - \arg(r_{xx}), \quad (3)$$

式中 $\Delta\varphi_{yx}$ 可以取 $[-180^\circ, 180^\circ]$ 范围的任意值,表明反射波能实现所有可能的偏振状态。

转换后反射波的偏振方向与入射波偏振方向之间的夹角^[18]为

$$\eta = \arctan\left(\frac{E_{yr}}{E_{xi}}\right). \quad (4)$$

3 结果与分析

图2所示为共偏振反射系数 r_{xx} 和交叉偏振反射系数 r_{yx} 以及偏振转换率的仿真结果。从图2(a)可以看出,在0.689 THz和0.924 THz两个谐振频率下,反射系数 r_{yx} 分别为0.97和0.98, r_{xx} 分别为0.026和0.005。从图2(b)可以看出,两个谐振频率下的偏振转换率均能达到1,表明在这两个频率下,几乎所有 $x(y)$ 偏振入射波都转化为 $y(x)$ 偏振波。此外,在0.64~1.19 THz的频率范围内(带宽为0.55 THz),可实现偏振转换率大于80%的交叉偏振转换,在0.65~1.06 THz的频率范围内(带宽为0.41 THz),可实现偏振转换率大于90%的交叉偏振转换。

图3所示为不同L形贴片个数下偏振转换器的偏振转换率的仿真结果。可以看出,当只有一个L形贴片结构时,该结构实现的是双带偏振转换效果;当叠加两个L形贴片结构时,该结构实现的是两个谐振频率间偏振转换率较小的宽带偏振转换效果;当L型贴片结构增加到三个时,该反射式偏振转换器可以在0.71~1.34 THz的频率范围内(带宽为0.63 THz),实现偏振转换率大于80%的交叉偏振转换。由此可知,随着L形贴片个数的增加,谐振频率点向左移动,两个谐振频率间的偏振转换率显著增大。

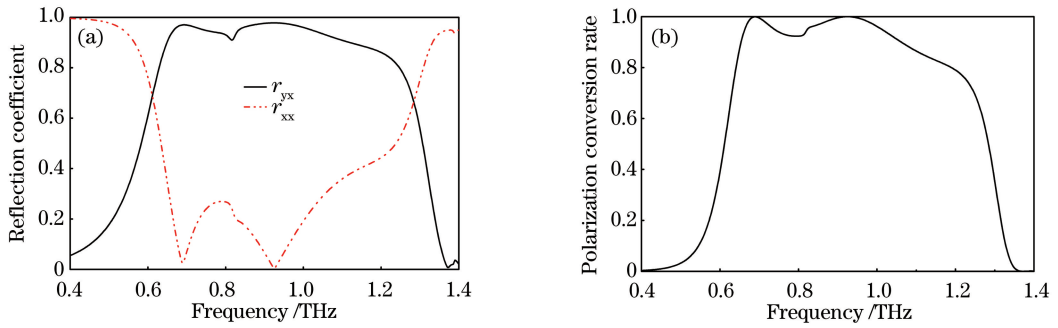


图2 偏振转换器的(a)共偏振反射系数 r_{xx} 和交叉偏振反射系数 r_{yx} 以及(b)偏振转换率
Fig. 2 (a) Co-polarization reflection coefficient r_{xx} , cross-polarization reflection coefficient r_{yx} , and (b) PCR of polarization converter

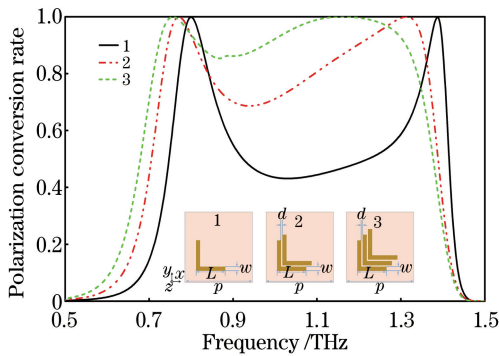


图3 不同L形贴片个数下偏振器的偏振转换率
Fig. 3 PCR of polarization converters with different numbers of L-shaped patches

在数值模拟过程中,各结构参数对结果的影响不同。已有相关研究,如超材料单元尺寸^[19]、介质层介电常数及厚度^[20]等对波调控的影响。这里只针对所提出的偏振转换器表层多个L形的金属结构中的各参数对波调控的影响进行讨论。在能够实现宽带偏振转换效果的情况下,当臂长 L 增大时,

谐振频率点向低频方向移动,两个谐振频率间的交叉偏振反射系数 r_{yx} 减小,共偏振反射系数 r_{xx} 增大,即在两个谐振频率间的偏振转换率减小。因此,臂长 L 选择较小的数值较为合适,但 L 过小会使宽带偏振转换效果消失。通过数值仿真,得到 $L = 65 \mu\text{m}$ 为最合适的臂长。在能够实现宽带偏振转换效果的情况下,当宽度 w 增大时,左侧谐振频率点位置不变,右侧谐振频率点向低频方向移动,即带宽减小,但两个谐振频率间的偏振转换率增大,仿真结果表明, $w = 9 \mu\text{m}$ 为最合适的宽度。另外,在能够实现宽带偏振转换效果的情况下,间距 d 的大小对偏振转换效果影响不大。

基于四个L形超材料偏振转换器的相位差 $\Delta\varphi_{yx}$ 如图4所示。在 0.689 THz 和 0.924 THz 的谐振频率下,线偏振波转换为其交叉偏振波, $\Delta\varphi_{yx} = 0^\circ$ 。然而,在 0.61 THz 和 1.28 THz 的频率下, $|r_{yx}|/|r_{xx}| = 1$ 时, $\Delta\varphi_{yx} = 90^\circ$,表示线偏振波转换为圆偏振波。

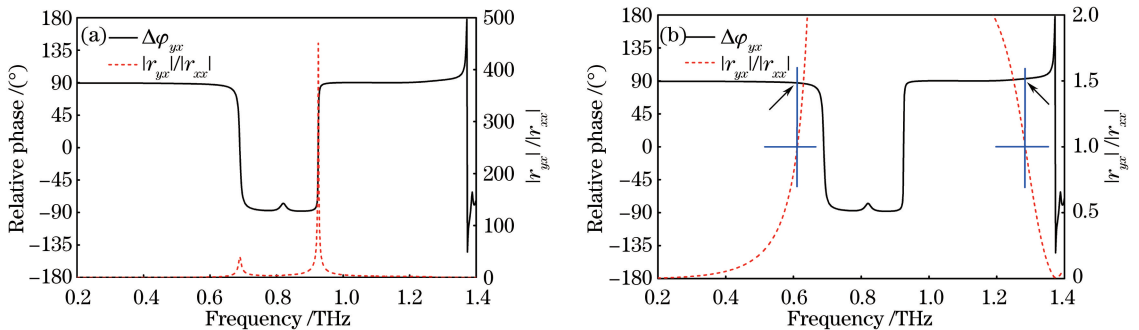


图4 r_{yx} 和 r_{xx} 及其相对相位 $\Delta\varphi_{yx}$ 与频率的关系。(a)完整图像;(b)局部图像

Fig. 4 r_{yx} , r_{xx} , and their corresponding relative phase $\Delta\varphi_{yx}$ versus frequency. (a) Full figure; (b) partial figure

进一步的数值模拟表明,在一定斜入射条件下,所设计的偏振转换器能基本维持其性能。图5(a)所示为不同入射角 θ 下 r_{yx} 的模拟结果。可以看出,

当入射角从 0° 增加到 30° , r_{yx} 的大小仍与 $\theta = 0^\circ$ 下的情况相差不多。图5(b)所示为不同入射角 θ 下 r_{xx} 的模拟结果。

为了更好地理解所设计的偏振转换器的物理机制,分析了 0.689 THz 和 0.924 THz 两个谐振频率下顶层结构和底层金属板上的电流分布,如图 6 所示。可以看出,在两个谐振频率下,底层金属板上的感生电流均与顶层超材料表面的电流反向,在电介质层中形成了电流环,由此可以判断,在两个谐振频率处产生的共振是磁共振。在 0.689 THz 的谐振频率下,当入射波为沿 x 轴方向的线偏振波时,感应磁场 H 沿着左下方向。感应磁场的 y 分量 H_y 垂直于入射电

场 E_i ,因此 H_y 与 E_i 之间不存在交叉耦合,对偏振转换没有影响。但感应磁场的 x 分量 H_x 与电场 E_i 平行,激发了垂直于 x 方向的电场(即垂直于入射电场的 y 偏振波),实现了偏振转换。同理,在 0.924 THz 的谐振频率下,当入射波为沿 x 轴方向的线偏振波时,感应磁场 H 沿着右下方向。感应磁场的 y 分量 H_y 垂直于入射电场 E_i ,不能引起偏振转换。但 x 分量 H_x 与电场 E_i 平行,激发了垂直于 x 方向的电场(即垂直于入射电场的 y 偏振波)。

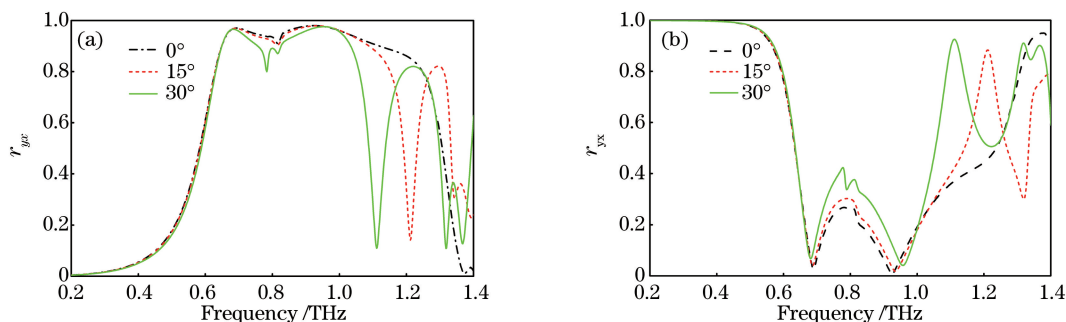


图 5 不同入射角下(a) r_{yx} 和(b) r_{xx} 的模拟结果

Fig. 5 Simulated results of (a) r_{yx} and (b) r_{xx} under different incident angles

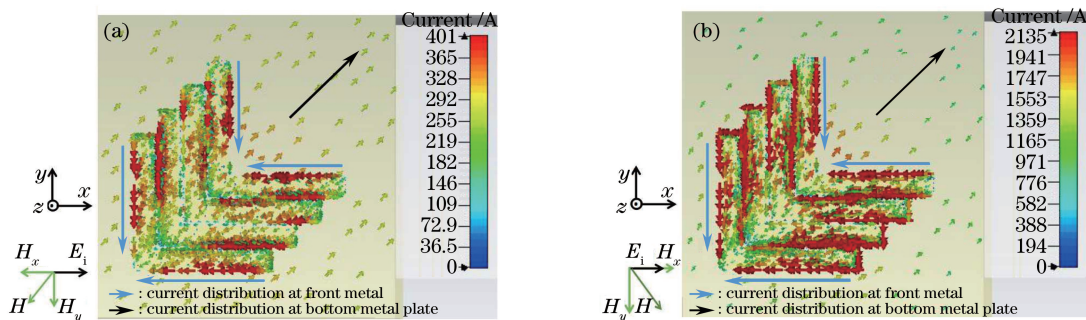


图 6 表层金属和底层金属板上的电流分布。(a) 0.689 THz;(b) 0.924 THz

Fig. 6 Current distributions at front metal and bottom metal plate. (a) 0.689 THz; (b) 0.924 THz

4 结 论

设计并仿真分析了一种太赫兹波段的宽带反射式偏振转换器。这种转换器可以将线偏振波转换为其交叉偏振波,在 0.64~1.19 THz 的频率范围内,可实现大于 80% 的偏振转换效率,也可以在 0.61 THz 和 1.28 THz 两个特定频率下,实现线偏振到圆偏振的转换。此外,当偏振波的入射角从 0° 增大到 30° 时,所提出的转换器仍可以保持良好的偏振转换性能。因此,所提出的偏振转换器的特性在太赫兹领域具有潜在的应用价值。

参 考 文 献

[1] 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.

[2] Sun Y R, Shi T L, Liu J J, *et al.* Terahertz label-free bio-sensing with EIT-like metamaterials[J].

Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0328001.

孙雅茹, 史同璐, 刘建军, 等. 太赫兹超材料类 EIT 谐振无标记生物传感[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0328001.

[3] Geng L, Xie Y N, Yuan Y. Graphene-based antenna with reconfigurable radiation pattern in terahertz[J].

Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(3): 031602.

耿莉, 谢亚楠, 原媛. 基于石墨烯的太赫兹方向图可重构天线[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(3): 031602.

- [4] 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.
- [5] Rutz F, Hasek T, Koch M, *et al.* Terahertz birefringence of liquid crystal polymers [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(22): 221911.
- [6] Withayachumnankul W, Abbott D. Metamaterials in the terahertz regime [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2009, 1(2): 99-118.
- [7] Cong L Q, Cao W, Zhang X Q, *et al.* A perfect metamaterial polarization rotator [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(17): 171107.
- [8] Cheng H, Chen S Q, Yu P, *et al.* Dynamically tunable broadband mid-infrared cross polarization converter based on graphene metamaterial [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(22): 223102.
- [9] Lévesque Q, Makhsiyan M, Bouchon P, *et al.* Plasmonic planar antenna for wideband and efficient linear polarization conversion [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(11): 111105.
- [10] Ma H F, Wang G Z, Kong G S, *et al.* Broadband circular and linear polarization conversions realized by thin birefringent reflective metasurfaces [J]. *Optical Materials Express*, 2014, 4(8): 1717-1724.
- [11] Jiang S C, Xiong X, Sarriugarte P, *et al.* Tuning the polarization state of light via time retardation with a microstructured surface [J]. *Physical Review B*, 2013, 88(16): 161104.
- [12] Yu J B, Ma H, Wang J F, *et al.* High-efficiency ultra-wideband polarization conversion metasurfaces based on split elliptical ring resonators [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(17): 0178101.
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): 0178101.
- [13] Hao J M, Yuan Y, Ran L X, *et al.* Manipulating electromagnetic wave polarizations by anisotropic metamaterials [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(6): 063908.
- [14] Sun W J, He Q, Hao J M, *et al.* A transparent metamaterial to manipulate electromagnetic wave polarizations [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(6): 927-929.
- [15] Wu L, Yang Z Y, Cheng Y Z, *et al.* Circular polarization converters based on bi-layered asymmetrical split ring metamaterials [J]. *Applied Physics A*, 2014, 116(2): 643-648.
- [16] Yong Z C, Withawat W, Aditi U, *et al.* Ultrabroadband reflective polarization convertor for terahertz waves [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(18): 181111.
- [17] Li M, Lan F, Yang Z Q, *et al.* Broadband and highly efficient sub-THz reflective polarization converter based on Z-shaped metasurface [C]. 6th International Conference on Mechatronics, Materials, Biotechnology and Environment, 2016: 427-432.
- [18] Mutlu M, Ozbay E. A transparent 90° polarization rotator by combining chirality and electromagnetic wave tunneling [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(5): 051909.
- [19] Wu J F, Sun M Z, Zhang C M. The relationship between resonant frequency band and cell size in left-handed materials [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(6): 3844-3847.
吴俊芳, 孙明昭, 张淳民. 左手材料的响应频段和单元尺寸关系的研究 [J]. *物理学报*, 2009, 58(6): 3844-3847.
- [20] Ao T H, Xu X D, Huang R, *et al.* Control of terahertz response properties of metamaterials by dielectric layer [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2015, 34(3): 333-339.
敖天宏, 许向东, 黄锐, 等. 介质层对超材料太赫兹响应特性的控制规律 [J]. *红外与毫米波学报*, 2015, 34(3): 333-339.