

# Ku 波段双 E 结构超薄高效反射型线性极化转换表面

张灿, 余世星, 龙飞, 杨晓昆, 张正平\*

贵州大学大数据与信息工程学院, 贵州 贵阳 550025

**摘要** 提出了一种利用电磁超表面实现 Ku 波段(12~18 GHz)的低剖面反射型线性极化转换表面,该表面能对 Ku 波段的线极化电磁波进行正交极化旋转。给出了极化转换表面的设计原理,并对极化转换表面工作的物理原理进行了解释,通过仿真确定了极化转换表面谐振点的位置。测试结果表明,该线性极化转换表面在工作频带内可以实现 80% 以上的转换效率,具有转换效率高、尺寸小、厚度薄和结构简单等优点。

**关键词** 表面光学; 极化转换表面; Ku 波段; 线性极化转换; 反射型

中图分类号 O441.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.092401

## Ultrathin High-Efficiency Reflective Linear Polarization Conversion Surface Using Double-E Structure for Ku-Band

Zhang Can, Yu Shixing, Long Fei, Yang Xiaokun, Zhang Zhengping\*

College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China

**Abstract** A low profile linear reflective polarization conversion surface in the Ku band (12-18 GHz) is proposed using a metasurface, which can convert a linearly polarized incident wave into its orthogonal polarization states in the Ku band. The principle of designing such a polarization conversion surface is given. The physical working mechanism of a polarization conversion surface is clarified. The simulation is used to determine the positions of resonance points of the polarization conversion surface. The test results show that the proposed polarization conversion surface has a conversion efficiency of more than 80% within the working band, and has the advantages of high conversion efficiency, small size, small thickness, and simple structure.

**Key words** optics at surfaces; polarization conversion surface; Ku band; linear polarization conversion; reflective

**OCIS codes** 240.4350; 240.5420; 350.1370

## 1 引言

电磁超材料(MMs)是一种人造亚波长复合结构。电磁超表面是电磁超材料的二维形式,具有低剖面特性,在功能上可以实现超常的电磁波特性<sup>[1-4]</sup>,如负折射<sup>[5-6]</sup>、异常折射或反射<sup>[7-8]</sup>,可用作完美吸波器<sup>[9-10]</sup>、隐形<sup>[11-12]</sup>等。Liu 等<sup>[11]</sup>提出将鱼骨形状阵列组成的极化转换超表面用于雷达散射截面(RCS)的减缩,并进行了实验验证。电磁超表面也能应用到毫米波领域。Ghalyon 等<sup>[13]</sup>提出了一种基于毫米波应用的两层结构的频率选择表面

(FSS),可以利用两层结构将线性极化电磁波转换成圆极化电磁波。电磁超表面还可以被用来制作极化可重构天线<sup>[14]</sup>,由电磁超表面、平面槽形天线和金属反射器组成的极化可重构天线可以被重新配置成线极化,以及左旋和右旋的圆极化。

极化转换表面是电磁超表面研究和应用的一个重要领域,通常有反射型和透射型。与传统的极化转换器相比,利用电磁超表面制作的极化转换器更轻薄,其应用范围更广。在展宽带宽方面,电磁超表面极化转换器可以通过单层多谐振结构或多层结构实现较大的带宽<sup>[15-19]</sup>。Feng 等<sup>[15]</sup>利用电磁超表面

收稿日期: 2018-10-31; 修回日期: 2018-11-20; 录用日期: 2018-11-27

基金项目: 中央引导地方科技发展专项资金(黔科中引地[2018]4009)、贵州省科技计划项目(黔科合平台人才[2017]5788)

\* E-mail: zpzhang@gzu.edu.cn

结构制作了带宽 2.0~3.5 GHz 的极化转换器,其极化转换效率(PCR)超过 54%,但厚度较大。Chen 等<sup>[16]</sup>采用电磁超表面实现了具有 4 个谐振点、带宽 3 dB 的线性极化转换器,但其 PCR 仅为 60%。Kundu 等<sup>[19]</sup>提出了一种针对 X 波段的极化转换表面,其带宽为 8~12 GHz,PCR 能达到 70%以上。

本文提出了一种高效反射型线性极化转换表面,该极化转换表面的工作频段为 11.6~18.6 GHz,仿真模拟和实验测试证实了这种极化转换表面已经覆盖了 Ku 波段的频率范围,在工作频段内可以将一个线性极化波的极化方向偏转 90°,同时保持转换效率大于 80%。对比其他极化转换器,其结构更简单,厚度更薄,易于融合到相关的应用设备中。文中采用共极化和交叉极化的  $uv$  坐标系(将  $xy$  坐标系中的  $x$  轴顺时针旋转 45°得到  $v$  轴,逆时针旋转 45°得到  $u$  轴)分解和分析此极化转换表面。

## 2 设计与仿真

反射模式的电磁超表面一般比透射模式具有更高的转换效率,通常包括顶层的超表面单元的排列、中间的介质层和底部的金属背板层等部分。超表面单元结构与金属背板间的介质层中会形成法布里-珀罗谐振腔<sup>[20]</sup>,谐振腔中的透射波经过多次反射,最后与没有进入谐振腔的反射波相互干涉形成最终形态的反射波。所以,只要调整介质层和超表面单元结构的设计与排列就能调整各向异性反射波的带宽,或者说设计优化整个电磁超表面结构的非共极化态的干涉和其分散特性,就能产生所需极化态的反射波。

运用以上原理,提出了一种新型的,能在 Ku 波段具有高效 PCR 的反射型极化转换表面,这种极化转换表面的超表面单元结构如图 1 所示。该表面由正面的斜轴对称图案、介质板和背面的金属板组成,斜轴对称图案由圆开口环变形而来,其形状像两个轴对称的 E 字母。介质层的材料为 F4BM265,其相对介电常数  $\epsilon_r=2.65$ ,损耗角正切值  $\tan \sigma=0.001$ ,厚度  $H=1.5$  mm,上表面刻蚀金属结构,下表面为金属地板。为了获得更宽的极化转换带宽和更高的 PCR,对各个参数进行了优化。经过优化的最优状态如图 1(a)所示,在顶面单元结构的几何尺寸中, $L$  为单元的长和宽, $D$  为斜轴对称图案的直径, $P$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  分别是确定斜轴对称图案的关键尺寸,其值分别为  $L=10$  mm, $D=7.4$  mm, $P=2.1$  mm, $C_1=0.2$  mm, $C_2=0.4$  mm, $C_3=2.8$  mm。

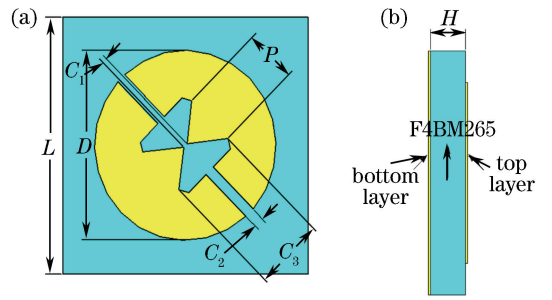


图 1 电磁超表面的单元结构。(a)正面;(b)侧面

Fig. 1 Schematic of metasurface unit.

(a) Front view; (b) side view

电磁超表面的反射原理如图 2(a)所示,将入射波的  $y$  方向极化分成  $v$  和  $u$  两部分以更好地观察反射过程,入射的电磁波可以表示为

$$\mathbf{E}_i = v\mathbf{E}_{iv} \exp(j\phi) + u\mathbf{E}_{iu} \exp(j\phi), \quad (1)$$

反射波可以表示为

$$\mathbf{E}_r = v\mathbf{E}_{rv} + u\mathbf{E}_{ru} = vr_v\mathbf{E}_{iv} \exp(j\phi_v) + ur_u\mathbf{E}_{iu} \exp(j\phi_u), \quad (2)$$

式中: $\mathbf{E}_i$  为入射的线性极化波; $\mathbf{E}_{iv}$  和  $\mathbf{E}_{iu}$  分别为  $v$  和  $u$  方向的入射波; $\mathbf{E}_r$  为最终的反射波; $\mathbf{E}_{rv}$  和  $\mathbf{E}_{ru}$  分别为  $v$  和  $u$  方向上的反射波; $r_v$  和  $r_u$  分别为电磁波在  $v$  和  $u$  方向上的反射效率; $\phi$  和  $\phi_v$ 、 $\phi_u$  分别为入射电磁波和反射电磁波的相位, $v$  与  $u$  分别为  $v$  和  $u$  方向上的单位矢量。由于所提出的电磁超表面具有各向异性,因此,当  $r_u \approx r_v$  并且相位差  $\Delta\phi = \phi_v - \phi_u \approx 180^\circ$  时,所形成的  $\mathbf{E}_r$  的方向为  $x$  轴方向,使线性极化波产生 90°的极化旋转。

用 HFSS 软件进行模拟仿真,采用 HFSS 中的 Floquet 端口和周期边界条件针对性地解决这一问题。Floquet 端口和周期性边界条件能有效地对二维周期性结构进行模拟仿真,还拥有多种扫频模式,其求解后的反射和传输系数能够以  $S$  参数的形式表示出来。Floquet 端口允许用户设置入射波的倾斜入射角和极化方式,并选择要观察的极化分量。仿真模拟得出来的该极化转换表面沿  $v$  和  $u$  方向的反射波振幅与相位差如图 2(b)所示,其中蓝色和红色连续实线分别表示沿  $u$  方向的反射波振幅( $R_u$ )和沿  $v$  方向的反射波振幅( $R_v$ ),黑色点线图表示两个方向上振幅的相位差( $\Delta\phi$ ),绿色虚线是相位差为 180°的辅助基准线。由图 2(b)可知,在 11.6~18.6 GHz,相位差和基准线 180°的差距都在 45°以内,结合图 3(b)中的 PCR 仿真模拟计算图来看,该频率区间内 PCR 都能达到 80%以上。另外,还可以看到相位差为 180°的基准线与相位差的点线图

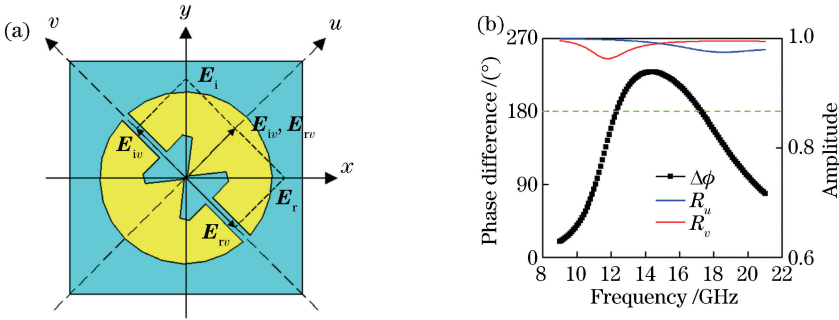


图 2 电磁超表面反射原理。(a) 电磁波沿  $v$  和  $u$  方向的分量示意图; (b)  $R_v$  和  $R_u$  的反射振幅和相位差  
 Fig. 2 Reflection principle of metasurface. (a) Schematic of electromagnetic wave components along  $v$  and  $u$  ;  
 (b) reflection amplitudes and phase differences of  $R_v$  and  $R_u$

有两个交点, 这两个交点所对应的频率分别为 12.3 GHz 和 17.1 GHz, 说明在这两个谐振点处  $\Delta\phi = 180^\circ$ , 可以使入射波产生完全的正交极化旋转。所以, 入射波除了沿  $v$  或者  $u$  单一方向入射时不能发生极化转换, 沿其他任意方向入射时, 由于在  $v$  和  $u$  方向的谐振波振幅与相位不一样, 它们叠加起来就会使反射波的极化方向发生旋转。

用  $R_{yy} = E_{yr}/E_{yi}$ ,  $R_{xy} = E_{xr}/E_{yi}$  分别表示同极化和交叉极化的反射效率, 式中  $E$  为电场, 下标  $i$  为入射电磁波, 下标  $r$  为反射电磁波,  $x$  与  $y$  分别为电磁波的两个极化方向。通过模拟计算的反射率和

PCR 如图 3(a)~(b) 所示, 图中 sim 表示模拟值。图 3(a) 中的红色实线为交叉极化反射率, 其工作频带的反射效率大于  $-3$  dB; 黑色点线为共极化反射率, 在工作频段内的反射率远远小于交叉极化反射率, 并且在 12.3 GHz 与 17.1 GHz 两个谐振点处, 交叉极化反射率都接近于 0 dB, 而共极化反射率甚至达到了  $-40$  dB。图 3(b) 为极化旋转超表面的 PCR,  $R_{\text{PCR}} = R_{xy}^2 / (R_{xy}^2 + R_{yy}^2)$ 。结果表明, 在 11.6~18.6 GHz, 转换率都大于 80%, 已经完全覆盖了 Ku 波段(12~18 GHz)的带宽, 并且谐振点处的转换效率接近于 1。

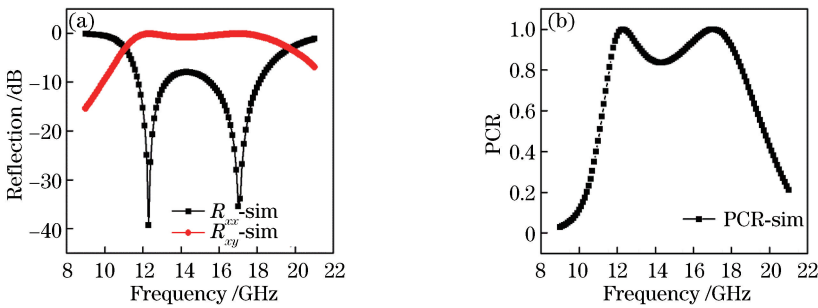


图 3 电磁超表面的仿真结果。(a) 反射系数; (b) PCR  
 Fig. 3 Simulation results of metasurface. (a) Reflection coefficient; (b) PCR

在两个谐振点处, 顶面单元结构的表面电流方向和底面金属背板层的表面电流方向分别如图 4(a) 和图 4(b) 所示。图 4(a) 左方的色度条标明了两图中表面电流  $J_{\text{surf}}$  的强度, 垂直的绿色坐标轴为  $x$  轴、水平的蓝色坐标轴为  $y$  轴, 用来标明方向, 中间黑色的箭头用来标明电磁超表面单元区域的电流方向。可以看到, 顶面单元结构的表面电流方向和平行的金属背板的感应电流方向始终相反, 因此在电介质基板中会形成一个电流环, 并在上下表面之间产生很强的磁场, 即构成一个等效磁谐振器。

为了更好地解释带宽特性的物理性质并给出谐振频率的方程, 研究了  $x$  方向上单元结构间的等效电路, 等效电路和简化等效电路图如图 5(a) 所示。在  $x$  方向上, 相邻金属结构之间的间隙和顶层金属结构与金属地板间相当于电容, 而单元结构和地板的金属本身可视为电感。根据等效电路图极化转换表面在  $x$  方向上的阻抗为

$$Z = \sum_{n=1}^2 Z_n = \sum_{n=1}^2 \frac{j(1 - \omega^2 L_n C_n)(2 - \omega^2 L_{gn} C_g)}{\omega[\omega^2 C_n C_g (L_n + L_{gn}) - (2C_n + C_g)]}, \quad (3)$$

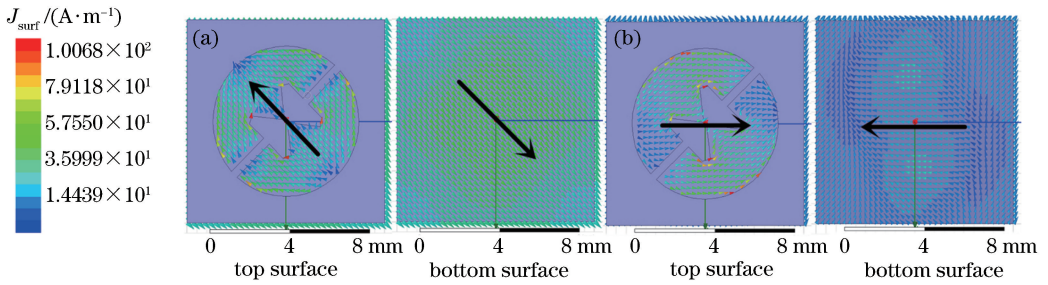


图 4 电磁超表面单元在不同谐振频率处的表面电流分布。(a) 12.3 GHz; (b) 17.1 GHz

Fig. 4 Surface current distributions of metasurface unit at different resonance frequencies. (a) 12.3 GHz; (b) 17.1 GHz

式中:  $L$  为感抗;  $C$  为容抗;  $Z$  为阻抗; 下标  $n$  用来区别顶层单元间不同的感抗、容抗或者阻抗; 下标  $g$  或  $gn$  用来表示或者区别顶层金属贴片和金属地板间的容抗或者感抗;  $\omega$  为计算感抗和容抗时候的角频率。根据所提出的极化转换表面的最终结构, 使用软件 ADS 优化得到以下参数:  $L_1 = 0.151$  nH,

$L_{g1} = 0.88$  nH,  $C_1 = 0.13$  pF,  $L_2 = 0.151$  nH,  $L_{g2} = 1.43$  nH,  $C_2 = 0.196$  pF,  $C_g = 0.5$  pF, 对于这些参数, 阻抗  $Z$  在 12.3 GHz 和 17.1 GHz 两个谐振频率点附近的值非常高, 如图 5(b) 所示。因此, 电流会沿  $y$  方向流动, 得到  $y$  极化反射波。

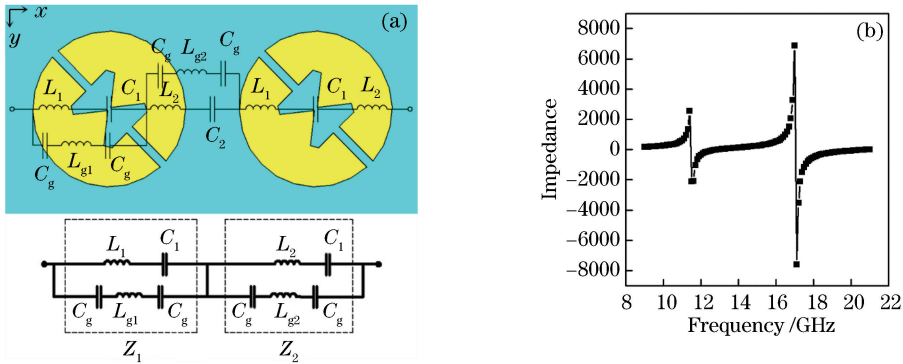


图 5 电磁超表面的等效电路与阻抗。(a) 等效电路分析图和简化等效电路图; (b) 等效电路的阻抗随频率的变化

Fig. 5 Equivalent circuit and impedance of metasurface. (a) Analysis diagram of equivalent circuit and simplified equivalent circuit; (b) impedance of equivalent circuit versus frequency

### 3 制作与测量

该极化转换表面样品由 400 个电磁超表面单元 (200 mm × 200 mm) 制作而成, 采用激光刻蚀制作工艺, 即利用高能激光光束照射到需要被刻蚀的表面并将其融化、气化, 从而刻蚀出一定深度的凹槽。相对于湿法刻蚀和等离子刻蚀, 激光刻蚀具有更高的精度、更稳定的良品率, 十分适合制作该类样品。极化转换表面的实物样品如图 6(a) 所示, 展示了极化转换表面整个正面及局部特写, 实验装置和测试环境如图 6(b) 所示。实验采用两个喇叭, 一个用来发射电磁波, 另外一个用来接收电磁波。喇叭与被测电磁超表面保持固定、较远的距离。发射喇叭和接收喇叭的高度和发射与接收端平面都始终保持在同一水平面上, 并在实验中将其中一个喇叭在

水平  $z$  轴上旋转  $90^\circ$ , 分别测量同极化反射和交叉极化反射的响应。为了获得实际电磁波反射响应, 除了测量电磁超表面的正面以外, 还需要测量电磁超表面的背面, 也就是一个金属材质和大小都一模一样的铜板的反射响应, 并将其作为基准线, 从测量的极化转换表面正面的反射响应中减去, 得到校准后的反射响应。模拟计算结果和反射系数的计算结果如图 7 所示, 其中 mea 表示测量值, sim 表示模拟值。结果表明, 测量结果与模拟仿真结果一致, 其中的部分差别和不同是由于电磁超表面的制作公差所致。

### 4 结 论

提出了一种利用简单几何形状单元设计并制作的具有低剖面的高效反射型线性极化转换表面,

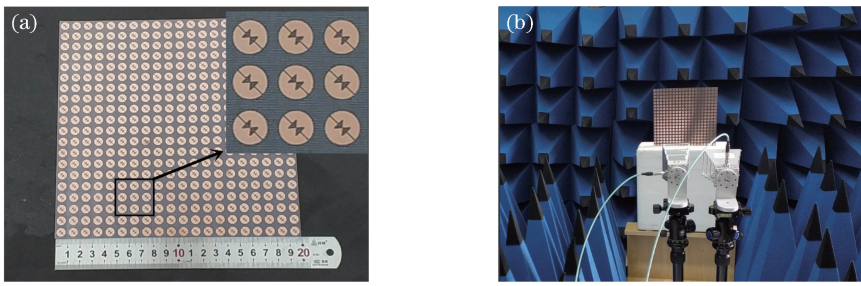


图6 实物和实验环境照片。(a)电磁超表面样品照片;(b)实验环境照片

Fig. 6 Physical map and photo of experimental environment. (a) Photo of metasurface sample; (b) photo of experimental environment

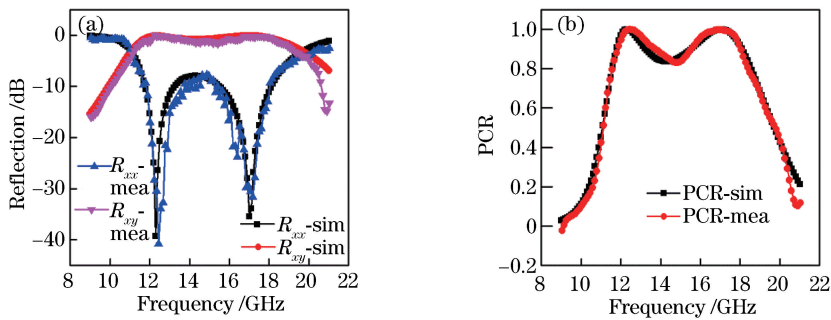


图7 仿真结果与实验结果的对比。(a)反射系数;(b)PCR

Fig. 7 Comparison between simulation results and experimental results. (a) Reflection coefficient; (b) PCR

并将其用于 Ku 波段频率。通过分析谐振点处的表面电流分布和对入射电磁波的分解,解释了其工作原理;经过仿真模拟和实际测量,验证其在 11.6~18.6 GHz 的工作带宽内可以将线性极化入射波转换成正交极化反射波,其带宽 100% 覆盖了 Ku 波段 (12~18 GHz),并在其中能使 PCR 达到 80% 以上,在谐振点处几乎达到 100%。实验测量结果与数值模拟仿真结果吻合良好。该极化转换表面在通信和微纳器件等领域具有广阔的应用前景。

### 参 考 文 献

- [1] Schurig D, Mock J, Justice B, *et al.* Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies [J]. *Science*, 2006, 314(5801): 977-980.
- [2] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(18): 3966.
- [3] Yang B, Cheng H, Chen S Q, *et al.* Multi-dimensional manipulation of optical field by metasurfaces based on Fourier analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0126007.  
杨渤,程化,陈树琪,等.基于傅里叶分析的超表面多维光场调控 [J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0126007.
- [4] Gong B Y, Zhao X P, Pan Z Z, *et al.* A visible metamaterial fabricated by self-assembly method [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 04713.
- [5] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. *Science*, 2001, 292(5514): 77-99.
- [6] Cheng Y Z, Nie Y, Gong R Z. Broadband 3D isotropic negative-index metamaterial based on fishnet structure [J]. *The European Physical Journal B*, 2012, 85: 62.
- [7] Liu K T, Liu X, Ge Y H, *et al.* Generation of OAM vortex beams based on high-efficiency transmission metasurfaces [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0126015.  
刘凯婷,刘鑫,葛悦禾,等.基于高效传输型超表面 OAM 涡旋波束的产生 [J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0126015.
- [8] Li Y H, Zhou L, Zhao G Z. Terahertz broadband polarization converter based on anisotropic metasurface [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(3): 0314001.  
李永花,周璐,赵国忠.基于各向异性超表面的太赫兹宽带偏振转换器 [J]. *中国激光*, 2018, 45(3): 0314001.
- [9] Iriarte J C, Pereda A T, de Falcon J L M, *et al.* Broadband radar cross-section reduction using AMC

- technology[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(12): 6136-6143.
- [10] Chen W G, Balanis C A, Birtcher C R. Checkerboard EBG surfaces for wideband radar cross section reduction[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(6): 2636-2645.
- [11] Liu Y, Li K, Jia Y T, *et al.* Wideband RCS reduction of a slot array antenna using polarization conversion metasurface [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(1): 326-331.
- [12] Jia Y T, Liu Y, Guo Y J, *et al.* Broadband polarization rotation reflective surfaces and their applications to RCS reduction[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(1): 179-188.
- [13] Ghalyon H A, Akbari M, Sebak A. A 30 GHz linear-to-circular polarization conversion using two-layer FSS [C] // IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2017, 978: 671-672.
- [14] Ni C, Chen M S, Zhang Z X, *et al.* Design of frequency-and polarization-reconfigurable antenna based on the polarization conversion metasurface[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(1): 78-81.
- [15] Feng M D, Wang J F, Ma H, *et al.* Broadband polarization rotator based on multi-order plasmon resonances and high impedance surfaces[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 114(7): 074508.
- [16] Chen H Y, Wang J F, Ma H, *et al.* Ultra-wideband polarization conversion metasurfaces based on multiple plasmon resonances[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115(15): 154504.
- [17] Mutlu M, Ozbay E. A transparent 90° polarization rotator by combining chirality and electromagnetic wave tunneling[J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(5): 051909.
- [18] Zhao Y, Belkin M A, Alù A. Twisted optical metamaterials for planarized ultrathin broadband circular polarizers [J]. Nature Communications, 2012, 3: 870.
- [19] Kundu D, Mohan A, Chakrabarty A. Ultrathin high-efficiency X-band reflective polarization converter using sunken double arrowhead metasurface [C] // Proceedings of the Asia-Pacific Microwave Conference, 2016: 16912824.
- [20] Liang W, Bockrath M, Bozovic D, *et al.* Fabry-Perot interference in a nanotube electron waveguide [J]. Nature, 2001, 411(6838): 665-669.