

激光与光电子学进展

双频角度无关的高透射率超构表面

李巍伶, 张岩*

首都师范大学物理系超材料与器件北京市重点实验室, 北京 100048

摘要 布儒斯特效应是指横磁波在两个界面上无反射高透射的传输现象。但是, 目前观察到的所有高透射率现象都是单一频率或单一入射角度。为此, 设计了可实现两个频率的角度无关高透射率太赫兹超构表面, 通过合理设计超构表面的参数, 使其在每个人射角上的纵波阻抗与空气严格匹配, 实现两个频率的角度无关高透射。仿真模拟、理论分析和实验结果相互一致, 证明了设计的可行性。所提方法还可扩展到其他波段, 对理想滤波器和空间移相器等光学器件进行设计。

关键词 材料; 全角度; 高透射率; 超构表面; 阻抗匹配

中图分类号 TN21

文献标志码 B

doi: 10.3788/LOP202259.0316002

Dual-Frequency Angle-Independent High-Transmittance Metasurface

Li Weiling, Zhang Yan*

Beijing Key Laboratory of Metamaterials and Devices, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China

Abstract The nonreflective high-transmittance transmission phenomenon was first discovered for the transverse magnetic wave between two interfaces; this is known as the Brewster effect. However, all high-transmittance phenomena observed so far are subject to a single frequency or angle of incidence. In this study, a terahertz metasurface that can achieve a dual-frequency angle-independent high transmittance is designed and fabricated. The angle-independent high transmittance can be realized depending on the strict match between the longitudinal wave impedance of the metasurface and air. Simulation, theoretical analysis, and experimental results are consistent with each other, proving the design feasibility. The proposed method can be extended to other frequencies; thus, a wide range of applications can be achieved, including ideal filters and spatial phase shifters.

Key words material; full angle; high transmittance; metasurface; impedance matching

1 引言

光在两种均匀的介质中传播时, 在介质交界面上会发生反射与透射现象^[1-2]。当横磁(TM)波以特定的入射角入射界面时, 不发生反射, 电磁波发生高效的透射, 这种现象称为布儒斯特效应^[3]。基于此

效应实现了偏光镜、宽带角度选择镜^[3-4]等器件。后来, 人们意识到该特殊光学现象还可以在横电(TE)波入射到各向异性^[5]、手性磁性介质表面^[6]和非磁性二维介质^[7]时发生。但是, 到目前为止观察到的所有高透射率现象都是单一频率或入射角度。这是因为从空气入射到介质表面时, 介质的纵波阻抗是关

收稿日期: 2021-03-08; 修回日期: 2021-04-19; 录用日期: 2021-05-16

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1711905)、国家自然科学基金(1174243, 11774246)、北京市百千万人才计划(2018A19)

通信作者: *yzhang@cnu.edu.cn

于角度的函数。当且仅当介质的波阻抗与空气的波阻抗相等时,才会发生无反射高透射率现象。

超构表面是将亚波长单元结构在二维平面内周期排列,构成二维形式的超构材料。超构表面一般由单层或者两至三层金属结构构成,厚度仅在亚波长范围内,加工太赫兹波段的超构表面只需标准的光刻技术,就可以很好地满足太赫兹的调制需求。通过单元结构使电磁波在超构表面结构两侧的相位以及幅度产生突变^[8],实现所需的调制。在许多领域中,超构表面已表现出巨大的应用潜力,涌现出众多研究成果,例如偏振转换器^[9-10]、异常折射^[11]、涡旋相位板^[12]、数字编码超构表面^[13-14]等。在实现高透射率光学现象中,也设计了许多超构表面^[15-17],但是这些超构表面的高透射现象均依赖单一频率或入射角度。例如2015年Zhu等^[15]介绍了一种可完全独立操控传输波的幅度和相位的超构表面设计,仅在3 GHz频率处,可实现多角度无反射传输。2016年Epstein等^[17]介绍了一种用于复杂光束操纵的超构表面,当原子实现切向和法向感应电偶极子的组合时,与两个正交偶极矩的相同频率色散可实现某一固定的斜入射的TM偏振波无反射完全传输。但是在一些实际应用中,例如双频雷达罩,需要两个频率的多角度高透射,实现信号和噪声的有效分离。因此,本文依据阻抗匹配原理设计在双频率上实现与角度无关的高透射率的超构表面。

1999年,英国皇家学院的Pendry等^[18]提出了用金属棒来调节复合材料的介电常数,用谐振环的磁谐振来调节材料的磁导率,从而调控材料的电磁阻抗并给出了相应的理论。基于此原理,本文设计采用传统的棒谐振器与环谐振器组合同时调节材料的介电常数和磁导率,调节材料在0.265 THz及0.334 THz的电磁阻抗,使其与空气相匹配,实现与角度无关的高效透射。模拟结果与实验结果显示,在两个工作频率上,在所有入射角中均可以观察到高透射现象。这种方法也可以扩展到光学波段,设计滤波器和空间移相等光学器件。

2 超构表面的设计

2.1 超构表面参数设计及模拟结果

材料的电磁阻抗 z 是介电常数与磁导率的函数 $z = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}}$,利用超构表面单元能独立调节材料的电响应与磁响应。因为棒状谐振器的Drude-

Lorentzian色散可产生数值由正到负的大范围有效介电常数,已经被用在负折射率超构材料的设计中^[19-20]。本文通过在超构表面中引入金属棒来控制电响应,但是棒状谐振器之间的相互耦合同时也会引入磁抗谐振^[21],本文再引入金属圆盘结构来抵消磁导率的变化^[22-23]。图1(a)为设计的超构表面结构单元的三维立体图,单元由介质基底、四个小的金属方框和金属圆盘组成。金属方框将产生电共振和轻微的磁共振,从而产生可调的电响应。同时,金属圆盘通过产生感应电流,得到与已施加磁场相反的各向异性磁矩^[23-24]。由此实现了金属方框调节介电常数大小,金属盘调整磁导率大小。样品的单元结构为左右对称结构,其中参数如图1(b)所示, $h = 140 \mu\text{m}$, $L = 230 \mu\text{m}$, $t = 0.2 \mu\text{m}$, $w_1 = 16 \mu\text{m}$, $w_2 = 8 \mu\text{m}$, $r_1 = 80 \mu\text{m}$, $r_2 = 40 \mu\text{m}$ 。该结构通过引入两组参数不同的金属方框和金属圆盘达到两个频率的共振。

依据所设计的样品尺寸,在时域有限差分(FDTD)算法中建模进行模拟以求太赫兹波入射下样品的反射光谱。建模时金属组件采用完美的导体(PEC),基底选择的电介质是硅,其在0.2~0.4 THz波段中折射率基本稳定在3.45。在模拟中,不考虑构成材料的损耗。图1(c)给出了TE波在不同角度入射下超构表面的反射光谱。由结果可知,随着角度的变化,在0.265 THz和0.334 THz处的反射都很微弱,基本不受角度影响。图1(d)给出了不同入射角度下反射谷的位置,可以看到,不同角度入射的工作频率曲线平缓偏移很小,可以确定工作频率稳定在0.265 THz及0.334 THz。

2.2 超构表面阻抗的计算

周期结构超表面的光学特性可以用介电常数 ϵ 和磁导率 μ 来表示,而 z 是关于介电常数 ϵ 和磁导率 μ 的函数。可以通过多种方法^[25-27]来评估复合结构的有效光学常数。太赫兹时域光谱系统(THz-TDS)可以精确测量太赫兹脉冲通过超构表面后脉冲的时域波形的变化,并从时域信号的傅里叶变换得出太赫兹电场的幅度和相位。结合THz-TDS系统的特性以及超构表面的结构厚度仅在亚波长范围,本文采用的方法是通过考虑多重反射^[25-26]来确定透射和反射系数,再由透射和反射系数计算得到波阻抗 z ^[28]。

如图2(a)所示,介质的上下表面的菲涅耳系数可表示为

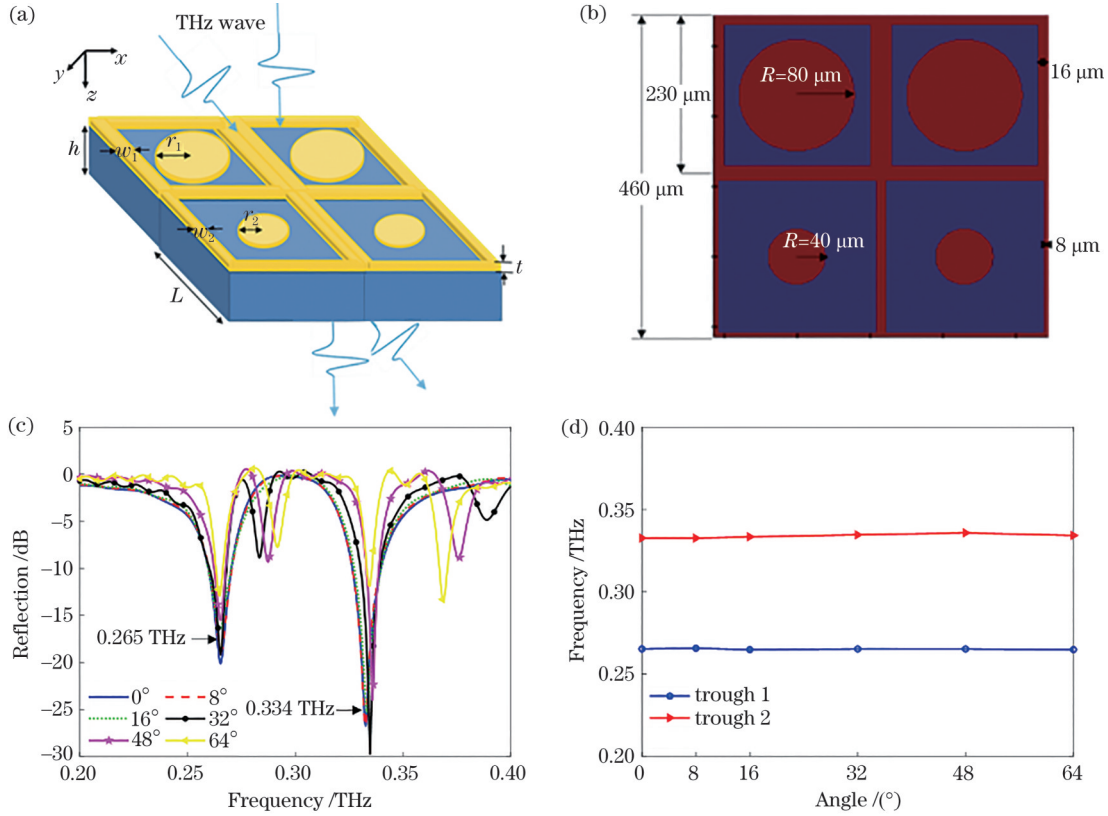


图 1 样品结构及其反射谱。(a)样品三维立体结构图；(b)样品二维平面结构图；(c)模拟计算得到的反射光谱；(d)不同入射角度的工作频率曲线

Fig. 1 Schematic of sample and its reflection spectra. (a) Three-dimensional view of sample; (b) two-dimensional structure diagram of sample; (c) reflectance spectrum calculated by simulation; (d) operating frequency curves at different incident angles

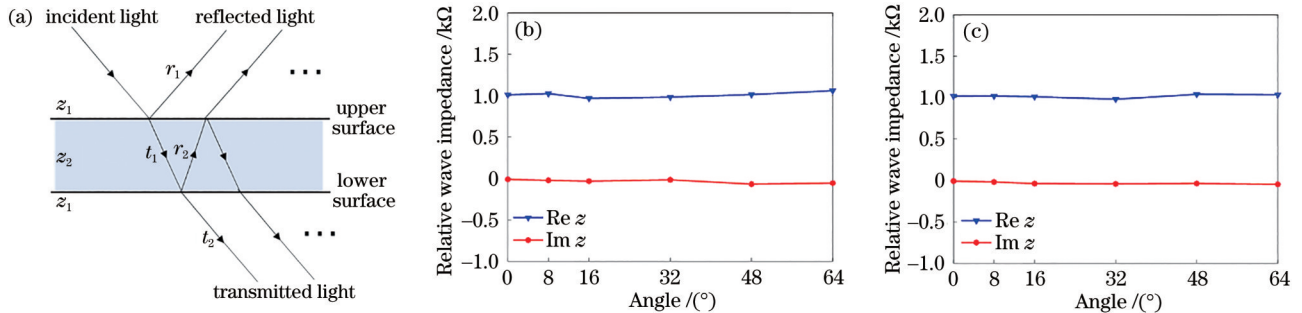


图 2 波阻抗计算结果。(a)不忽略多重反射的建模示意图；(b)样品在第一个工作频率 0.265 THz 的波阻抗计算结果；(c)样品在第二个工作频率 0.334 THz 的波阻抗计算结果

Fig. 2 Wave impedance calculation results. (a) Modeling diagram without ignoring multiple reflections; (b) wave impedance calculation result of sample at first working frequency of 0.265 THz; (c) wave impedance calculation result of sample at second working frequency of 0.334 THz

$$t_1 = \frac{2z_1}{z_1 + z_2}, t_2 = \frac{2z_2}{z_1 + z_2}, \quad (1)$$

$$r_1 = \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2}, r_2 = \frac{z_2 - z_1}{z_1 + z_2}. \quad (2)$$

当超构表面在空气中时,空气的相对波阻抗为 1,令超构表面的相对波阻抗为 z ,则(1)、(2)式变为

$$t_1 = \frac{2}{1 + z}, t_2 = \frac{2z}{1 + z}, \quad (3)$$

$$r_1 = \frac{1 - z}{1 + z}, r_2 = \frac{z - 1}{1 + z}. \quad (4)$$

令样品的有效厚度为 d ,折射率为 n , $\omega = 2\pi f$,其中 f 为入射太赫兹光的频率, c 为光速,在不忽略多重反射的情况下,太赫兹波经超构表面透射后的

电场与无透射样品的电场比值为

$$\tilde{T} = \frac{\tilde{E}_{\text{sam}}}{\tilde{E}_{\text{ref}}} = t_1 \exp(\text{ind}\omega/c) t_2 + t_1 \exp(\text{ind}\omega/c) r_2^2 \exp(2\text{ind}\omega/c) t_2 + t_1 \exp(\text{ind}\omega/c) r_2^2 \exp(2\text{ind}\omega/c) r_2^2 \exp(2\text{ind}\omega/c) t_2 + \dots \quad (5)$$

将(3)、(4)式代入(5)式后化简,可得:

$$\tilde{T} = \frac{4z}{(z+1)^2} \frac{\exp(\text{ind}\omega/c)}{1 - \left(\frac{z-1}{z+1}\right)^2 \exp(2\text{ind}\omega/c)} \quad (6)$$

在不忽略多重反射的情况下,太赫兹波被超构表面反射后的电场与 THz 被理想金属反射后的电场比值为

$$\tilde{R} = \frac{\tilde{E}_{\text{sam}}}{\tilde{E}_{\text{ref}}} = r_1 + t_1 \exp(2\text{ind}\omega/c) r_2 t_2 + t_1 \exp(2\text{ind}\omega/c) r_2^2 \exp(2\text{ind}\omega/c) r_2 t_2 + t_1 \exp(2\text{ind}\omega/c) r_2^2 \exp(2\text{ind}\omega/c) r_2^2 \exp(2\text{ind}\omega/c) r_2 t_2 + \dots \quad (7)$$

将(3)、(4)式代入(7)式后可化简为

$$\tilde{R} = \frac{z-1}{z+1} + \frac{4z(1-z)}{(z+1)^3} \frac{\exp(2\text{ind}\omega/c)}{1 - \left(\frac{z-1}{z+1}\right)^2 \exp(2\text{ind}\omega/c)} \quad (8)$$

联立(6)式、(8)式可得:

$$z^2 = \frac{\tilde{T}^2 - (1 + \tilde{R})^2}{\tilde{T}^2 - (1 - \tilde{R})^2} \quad (9)$$

在 FDTD 中建模进行模拟计算得到太赫兹反射与透射的时域信号后,进行傅里叶变换等数据处理,代入(9)式计算得到各个角度入射下的超构表面在工作频率 0.265 THz、0.334 THz 处的波阻抗,结果如图 2(b)、(c)所示。由结果可得,在工作频率处超构表面的相对波阻抗基本吻合空气的相对波阻抗 1,其虚部基本为 0。

2.3 超构表面近场电场分析

针对样品的两个反射波谷,本文利用 FDTD 算法计算了金属结构附近的电场分布。在 TE 波垂直入射情况下,两个频率所对应的电场分布分别如图 3(a)、(b)所示,可以看到两个反射波谷是由不同半径的圆盘结构响应得到,且不同半径的圆盘结构间没有耦合,因而也没有引起其他波谷的出现,满足多频高透射率超构表面的设计要求。当 TE 波以 48° 入射时,该结构的近场电场分布如图 3(c)、(d)所示。对比垂直入射的情况可知,在不同角度入射时,结构仍是保持不同半径的圆盘结构单独响应,保证了与角度无关的高透射率的稳定性。

本工作中所设计的超构表面由四个小单元结构组成,通过改变圆盘半径实现了对不同频率太赫兹

波的响应,并保证单元结构之间不会因为耦合而互相影响。在设计过程中,本文对 TE 波垂直入射时,单元结构的不同摆放位置引起的电场不同响应结果进行了探究,最终选择了如图 1(a)所示的组合,当几何参数相同的小单元结构关于太赫兹波偏振态对称摆放时,小单元结构之间的耦合最小,效果最好。

2.4 超构表面样品制作及表征

为了实验验证先前的理论分析和模拟结果,本文利用光刻技术和金属蒸镀技术制备了样品,基底选用的是 1 inch (1 inch = 2.54 cm) 高电阻率硅片,样品依据设计的单元结构周期重复覆盖整个硅片。硅片的厚度为 140 μm,电阻率超过 20 kΩ/cm。图 4(a)为样品的光学照片,图 4(b)为 10 倍显微镜下得到的样品结构平面结果。样品表征选用的是大恒科技 CIP-FICO-II 型时域光谱仪,光路图如图 4(c)所示。太赫兹信号的产生和探测都是由光导天线完成的。时域信号范围为 0~100 ps,取点 3751 个,在所需频率 0.2~0.4 THz 内有效取点数约为 20,频谱分辨率为 0.01 THz。将样品置于光路中太赫兹波焦点位置,需要不同角度测量时通过旋转样品支架的旋转平移台实现,并选择 0°、10°、20°、30°、40°、50°、60°

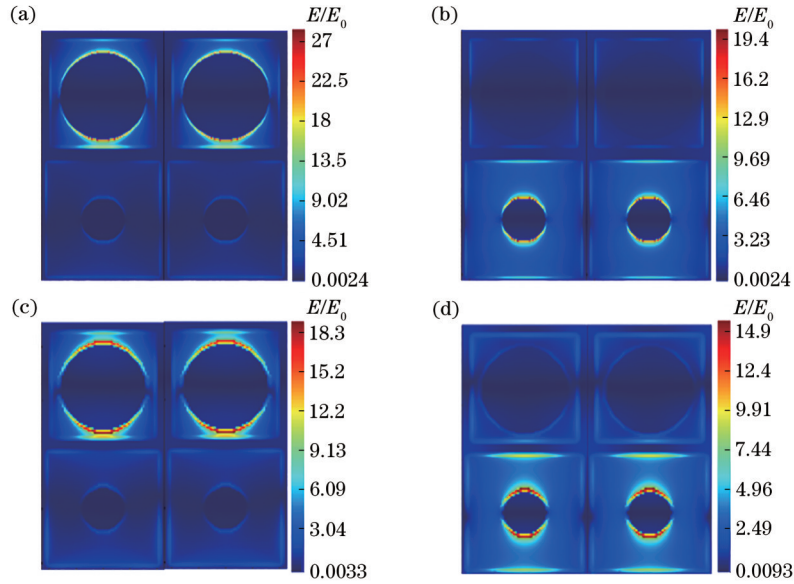


图 3 超构表面的近场电场响应。(a)(b) TE波垂直入射下结构在工作频率 1 和 2 的近场电场分布;(c)(d) TE波 48°倾斜入射时结构在工作频率 1 和 2 时的近场电场分布

Fig. 3 Near-field electric field response of metasurfaces. (a)(b) Near-field electric field responses of structure of working frequency 1 and 2 under normal incidence of TE wave; (c)(d) near-field electric field at working frequency 1 and 2 when TE wave is incident at 48°

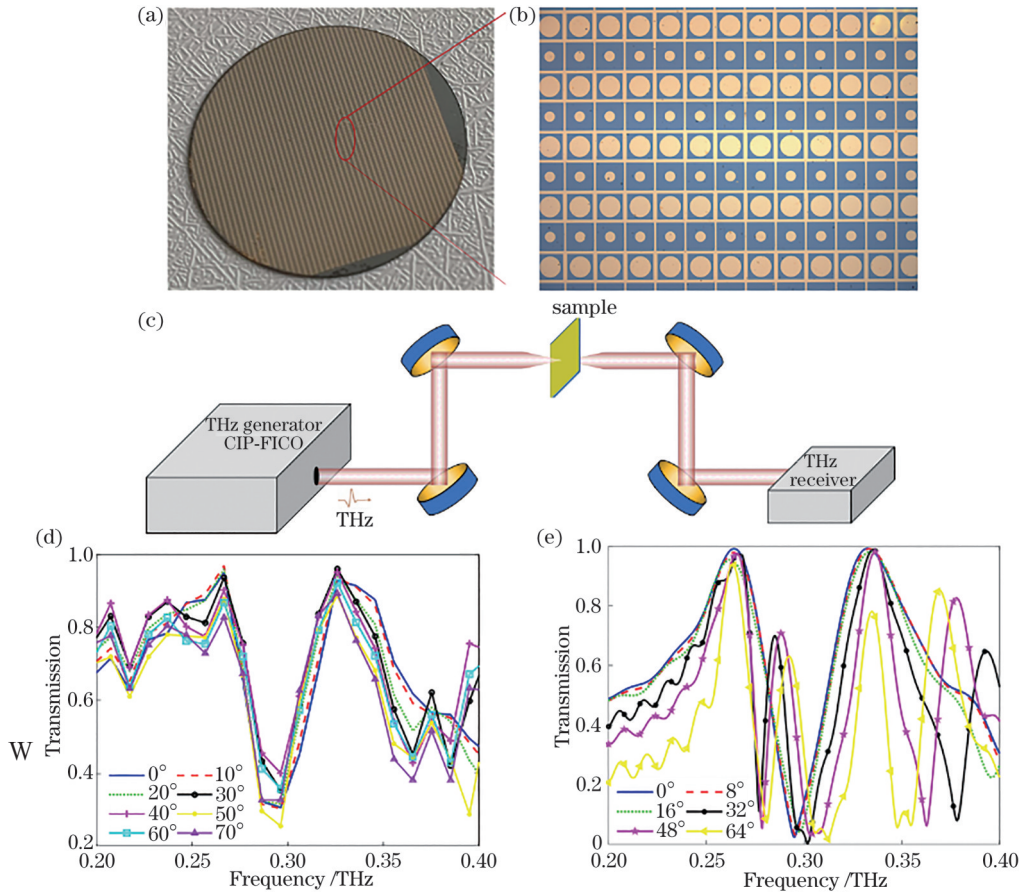


图 4 实验结果。(a)样品图;(b)放大图;(c)实验光路图;(d)实验的透射光谱;(e)模拟的透射光谱

Fig. 4 Experimental results. (a) Sample image; (b) enlarged image; (c) diagram of experimental system; (d) experimental transmission spectra; (e) simulated transmission spectra

和 70° 进行测量。图 4(d) 给出了测量得到的透射光谱, 可以看到在两个工作频率处都得到了透射振幅的最大值, 透射峰值的位置为 0.27 THz、0.33 THz, 在实验频谱分辨率限制下, 没有发现工作频率的移动。模拟的透射谱在入射角大于 32° 后, 两个工作频率间出现的小峰值半峰全宽仅为 0.01 THz, 由实验可知两个峰值的距离缩小。由于实验系统的频谱分辨率较低, 故此实验得到的光谱中并未测出这部分信息。但透射峰值的位置及大小基本与模拟得到的图 4(e) 的透射光谱一致, 可证明样品在太赫兹波段能实现双频率与角度无关的高透射率效果。

3 结 论

本文研究了太赫兹超构表面上与角度无关的高透射现象, 模拟与实验均证明了 TE 波在 0.265 THz 及 0.334 THz 均能实现设计的效果。FDTD 仿真、理论分析和实验结果彼此一致。与此前的文献相比, 本工作突破了频率以及入射角度对无反射高透射现象的限制。所提方法简单并具有可迁移性, 可以扩展到其他频率。希望这项工作能激发新技术的应用, 对太赫兹波段的超构表面研究有所贡献。

参 考 文 献

- [1] Krasnok A E, Miroshnichenko A E, Belov P A, et al. Huygens optical elements and Yagi-Uda nanoantennas based on dielectric nanoparticles[J]. JETP Letters, 2011, 94(8): 593-598.
- [2] Yeh C, Casey K F. Reflection and transmission of electromagnetic waves by a moving dielectric slab[J]. Physical Review, 1966, 144(2): 665-669.
- [3] Maystre D, Petit R. Brewster incidence for metallic gratings[J]. Optics Communications, 1976, 17(2): 196-200.
- [4] Shen Y, Ye D, Celanovic I, et al. Optical broadband angular selectivity[J]. Science, 2014, 343(6178): 1499-1501.
- [5] Watanabe R, Iwanaga M, Ishihara T. S-polarization Brewster's angle of stratified metal-dielectric metamaterial in optical regime[J]. Physica Status Solidi (b), 2008, 245(12): 2696-2701.
- [6] Bassiri S, Papas C H, Engheta N. Electromagnetic wave propagation through a dielectric-chiral interface and through a chiral slab[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1988, 5(9): 1450-1459.
- [7] Lin X, Shen Y C, Kaminer I, et al. Transverse-electric Brewster effect enabled by nonmagnetic two-dimensional materials[J]. Physical Review A, 2016, 94(2): 023836.
- [8] Yu N, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. Science, 2011, 334(6054): 333-337.
- [9] Ba Z L, Wang X. High-efficiency wideband millimeter wave metasurface structure with gradient phase[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(18): 181601. 巴钟灵, 王雄. 具有梯度相位的高效宽带毫米波超表面结构[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(18): 181601.
- [10] Zhang C, Yu S X, Long F, et al. Ultrathin high-efficiency reflective linear polarization conversion surface using double-E structure for Ku-band[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(9): 092401. 张灿, 余世星, 龙飞, 等. Ku 波段双 E 结构超薄高效反射型线性极化转换表面[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(9): 092401.
- [11] Liu K T, Liu X, Ge Y H, et al. Generation of orbital angular momentum vortex beams based on high-efficiency transmission metasurfaces[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(1): 0126016. 刘凯婷, 刘鑫, 葛悦禾, 等. 基于高效传输型超表面轨道角动量涡旋波束的产生[J]. 光学学报, 2019, 39(1): 0126016.
- [12] Jin J J, Luo J, Zhang X H, et al. Generation and detection of orbital angular momentum via metasurface[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 24286.
- [13] Gao L H, Cheng Q, Yang J, et al. Broadband diffusion of terahertz waves by multi-bit coding metasurfaces[J]. Light: Science & Applications, 2015, 4(9): e324.
- [14] Zhang Y, Xie B Y, Liu W W, et al. Anomalous reflection and vortex beam generation by multi-bit coding acoustic metasurfaces[J]. Applied Physics Letters, 2019, 114(9): 091905.
- [15] Zhu B O, Feng Y J. Passive metasurface for reflectionless and arbitrary control of electromagnetic wave transmission[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(12): 5500-5511.
- [16] Kwon D H, Ptitsyn G, Díaz-Rubio A, et al. Transmission magnitude and phase control for polarization-preserving reflectionless metasurfaces[J]. Physical Review Applied, 2018, 9(3): 034005.
- [17] Epstein A, Eleftheriades G V. Synthesis of passive lossless metasurfaces using auxiliary fields for reflectionless beam splitting and perfect reflection[J]. Physical Review Letters, 2016, 117(25): 256103.

- [18] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47(11): 2075-2084.
- [19] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, et al. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures[J]. *Physical Review Letters*, 1996, 76(25): 4773-4776.
- [20] Dani K M, Ku Z Y, Upadhyaya P C, et al. Subpicosecond optical switching with a negative index metamaterial[J]. *Nano Letters*, 2009, 9(10): 3565-3569.
- [21] Koschny T, Markos P, Smith D R, et al. Resonant and antiresonant frequency dependence of the effective parameters of metamaterials[J]. *Physical Review E*, 2003, 68(6): 065602.
- [22] Chen H S, Huang L, Cheng X X, et al. Magnetic properties of metamaterial composed of closed rings [J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2011, 115: 317-326.
- [23] Hu X H, Chan C T, Zi J, et al. Diamagnetic response of metallic photonic crystals at infrared and visible frequencies[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(22): 223901.
- [24] Ye D X, Lu L, Joannopoulos J D, et al. Invisible metallic mesh[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, 2016, 113(10): 2568-2572.
- [25] Nicolson A M, Ross G F. Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1970, 19(4): 377-382.
- [26] Smith D R, Schultz S, Markoš P, et al. Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients[J]. *Physical Review B*, 2002, 65(19): 195104.
- [27] Iwanaga M. Effective optical constants in stratified metal-dielectric metamaterial[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(10): 1314-1316.
- [28] Minowa Y, Fujii T, Nagai M, et al. Evaluation of effective electric permittivity and magnetic permeability in metamaterial slabs by terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Optics Express*, 2008, 16(7): 4785-4796.