

太赫兹 V-形错位超表面异常折射振幅调控研究

汪云¹, 章少华¹, 沈云^{2,3**}, 邓晓华^{3*}, 罗小青⁴

¹南昌大学材料科学与工程学院, 江西 南昌 330031;

²南昌大学物理系, 江西 南昌 330031;

³南昌大学空间科学与技术研究院, 江西 南昌 330031;

⁴中国科学院上海微系统与信息技术研究所太赫兹固态技术重点实验室, 上海 200050

摘要 提出了每个超晶胞由 8 个不同 V-形天线组成的双周期超晶胞错位超表面结构, 并从理论和实验上研究了其特性。计算表明, 当横电光垂直入射时, 会得到共偏振透射和交叉偏振异常折射。通过调节两个超晶胞周期单元的横向错开距离, 可改变异常折射的相位差, 调控其振幅。实验结果表明, 当 4.3 THz 的光垂直入射到两个超晶胞周期单元横向错开距离为 0, 2, 4, 6 个 V-形单元的样品上时, 异常折射光强分别为入射光强的 3.6%, 1.7%, 0.7%, 1.9%, 与计算结果一致。

关键词 集成光学; 太赫兹; 超表面; 异常折射; 振幅调控

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0713001

Manipulation on Amplitude of Anomalous Refraction in Staggered Terahertz V-Shaped Metasurface

Wang Yun¹, Zhang Shaohua¹, Shen Yun^{2,3**}, Deng Xiaohua^{3*}, Luo Xiaoqing⁴

¹School of Materials Science and Engineering, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China;

²Department of Physics, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China;

³Institute of Space Science and Technology, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China;

⁴Key Laboratory of Terahertz Solid-State Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China

Abstract A staggered metasurface structure that consists of double-periodic supercells with eight different V-shaped antennas is proposed and its properties are studied theoretically and experimentally. The calculation shows that co-polarized transmission and cross-polarized anomalous refraction can be obtained when the transverse electric light is incident vertically. The phase difference of anomalous refraction can be changed and its amplitude can be regulated by adjusting the transverse misalignment distance between two periodic supercell units. The experimental results show that, when the 4.3 THz light is vertically incident on the samples with two supercells staggered by 0, 2, 4 and 6 V-shaped antenna unit cells, the anomalous refraction intensities are 3.6%, 1.7%, 0.7%, and 1.9% of the incident light intensity, respectively, which is consistent with the calculated results.

Key words integrated optics; terahertz; metasurface; anomalous refraction; manipulation of amplitude

OCIS codes 130.5440; 300.6495

1 引 言

THz 波在频谱^[1]、成像^[2]、无损检测^[3]等领域中具有非常重要的应用价值。调制是对信号的振幅^[4]、频率^[5]或相位^[6]进行变更, 是 THz 通信^[7]、隐身^[8]、成像^[9]、光谱^[10]等方面必不可少的技术。近

年来, THz 源^[11-12]及探测器^[13]的研究得到快速发展, 但操控 THz 的调制器件发展却相对缓慢, 这严重影响了 THz 技术从理论走向实际应用的进程, 因此研究和制备 THz 功能调制器件具有重要意义。

超表面是尺寸处于亚波长尺度下的人工微结构, 可在光的传播路径上引入梯度相位, 从而操纵光

收稿日期: 2019-10-16; 修回日期: 2019-11-26; 录用日期: 2019-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(61865009)

* E-mail: Dengxiaohua0@gmail.com; ** E-mail: shenyun@ncu.edu.cn

在亚波长下传播^[14]。通过设计不同超表面结构的几何参数和排列周期,可以在亚波长尺度下实现光场相位^[15]、偏振态^[16]和振幅^[17]的完全调控。目前,基于超表面结构的偏振转换器件在超结构^[18]、光弯曲^[19]、平面透镜^[20]、圆偏振器^[21]、半波片^[22]和1/4波片^[23]等许多领域都得到了广泛应用。相位调控器件如涡旋光束产生器^[24]、涡旋光分束器^[25-26]及电磁感应透明^[27]的研究也已经引起了极大关注。在光场的振幅调控方面,可以利用几何相位调控光强分布实现全息投影^[28-30];以金属作为反射层,通过超表面三明治结构,实现光场入射角无依赖的完美吸收;利用双层超表面实现耦合双向吸收^[31-32]。国内外目前已对光振幅的调控进行了许多研究,但振幅的调控大多处于可见光及红外波段。另外,由于存在反射、吸收等原因,交叉偏振折射光存在转换效率低下的问题^[33],可以通过改用介质超材料来降低传输损耗,或者使用反射型偏振转换器来提高偏振转换效率^[34],因此在 THz 波段的振幅调制研究具有一定的意义。

本文将超表面用于 THz 振幅调制:基于 V-形梯度超表面相位调控,实现了共偏振透射和交叉偏振异常折射;基于相位干涉原理,通过改变 V-形结构周期单元间的错位排列,实现了异常折射光振幅的调节。此研究丰富了相位、偏振态及振幅的调控方式,在 THz 检测和调控等方面有一定的应用价值。

2 结构与数值模拟

V-形梯度超表面结构如图 1 中插图 I 所示,它由超晶胞周期排列而成,每个超晶胞由 8 个不同 V-形天线组成,其中 z 表示入射光方向, x 和 y 分别表示入射光的磁场和电场的方向。通常情况下,THz 波在超表面中的传播满足 Snell 定律:

$$n_i \sin(\varphi) - n_t \sin(\theta) = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{\Delta\phi}{\Delta\Gamma}, \quad (1)$$

式中: θ 和 φ 分别为入射角和折射角; n_i 和 n_t 分别为入射和折射介质的折射率; λ_0 是入射光的波长; ϕ 和 Γ 分别为入射光与超表面界面接触点处的相位和水平距离, $\frac{\Delta\phi}{\Delta\Gamma}$ 为相位梯度。设晶胞的周期长度为 p ,当相位梯度 $\frac{\Delta\phi}{\Delta\Gamma} = \frac{2\pi}{p}$ 时,异常折射角 $\varphi =$

$$\arcsin\left[\frac{n_i}{n_t}\sin(\theta) + \frac{\lambda_0}{n_t p}\right].$$

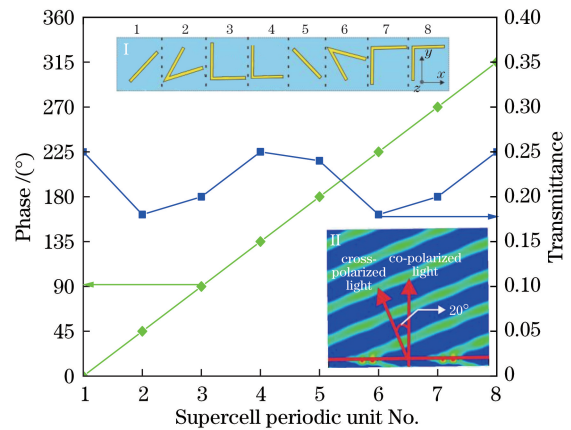


图 1 4.3 THz 光入射时超晶胞结构单元(插图 I)及各单元对应的交叉偏振散射相位、透射率。插图 II 为异常折射在 4.3 THz 处的传播相位剖面

Fig. 1 Schematic of periodic supercell unit (inset I) as well as cross-polarized scattering phase and transmittance for 4.3 THz incident light. Phase distribution simulation of anomalous refraction at 4.3 THz is shown in inset II

在实际结构设计中,可以通过 CST microwave studio 软件设计合适的超晶胞单元结构,使其交叉偏振散射相位从 0 覆盖到 2π ,从而得到折射角为 φ 的异常折射。当 4.3 THz 的光垂直入射 V-形天线时,具体参数选择如下:1~4 号 V-形天线臂宽为 $5 \mu\text{m}$,厚 $0.2 \mu\text{m}$,臂长从左至右分别是 $24.0, 23.5, 20.0, 15.8 \mu\text{m}$ 。天线夹角从左至右分别是 $0^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 90^\circ$ 。各单元结构边长为 $25 \mu\text{m}$ 。5~8 号 V-形天线分别由 1~4 号 V-形天线顺时针中心旋转 90° 得到。8 个单元构成的超晶胞结构周期为 $200 \mu\text{m}$ 。在以上参数条件下,单元 1~8 覆盖的相位为 $0 \sim 2\pi$,相邻单元间相位差为 $\pi/4$,8 个单元对应的透射率相差不大,在 20% 左右。当沿 y 方向偏振,频率为 4.3 THz 的横电(TE)波正入射时,根据异常折射角方程可知,其异常偏折光的折射角为 20° 。对于该结构的相位分布,CST microwave studio 软件计算结果如图 1 右下插图 II 所示。其结果表明,TE 光正入射时可同时得到垂直出射的 TE 共偏振光及异常偏折的横磁(TM)交叉偏振光,异常偏折角约为 20° ,与理论计算结果一致。

为进一步研究超表面的振幅调控特性,将超表面结构中的 V-形结构超晶胞周期单元错位排列,如图 2(a)~(d)所示,其错开距离依次为 $0, 1/4, 2/4, 3/4$ 个周期。对于这四个超晶胞结构,交错的两个超晶胞单元出射的异常偏振光之间分别有 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 的相位差。根据干涉原理可知,当两束光的

频率和偏振方向相同,相位差固定时,干涉光强满足:

$$I = I_A + I_B + 2\sqrt{I_A \cdot I_B} \cos(\Delta), \quad (2)$$

式中: I_A 和 I_B 分别为超晶胞 A 和超晶胞 B 异常折射光强,A、B 结构相同时有 $I_A = I_B = I_0$, I_0 为单位

光强; Δ 为相位差。对于图 2(a)~(d)中由 A 和 B 组成的周期阵列结构, $\Delta = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 时,根据(2)式,其出射面上的平均光强依次为 $I_0, \frac{I_0}{2}, 0, \frac{I_0}{2}$, 即异常折射透射率比为 2:1:0:1,形成光强调制。

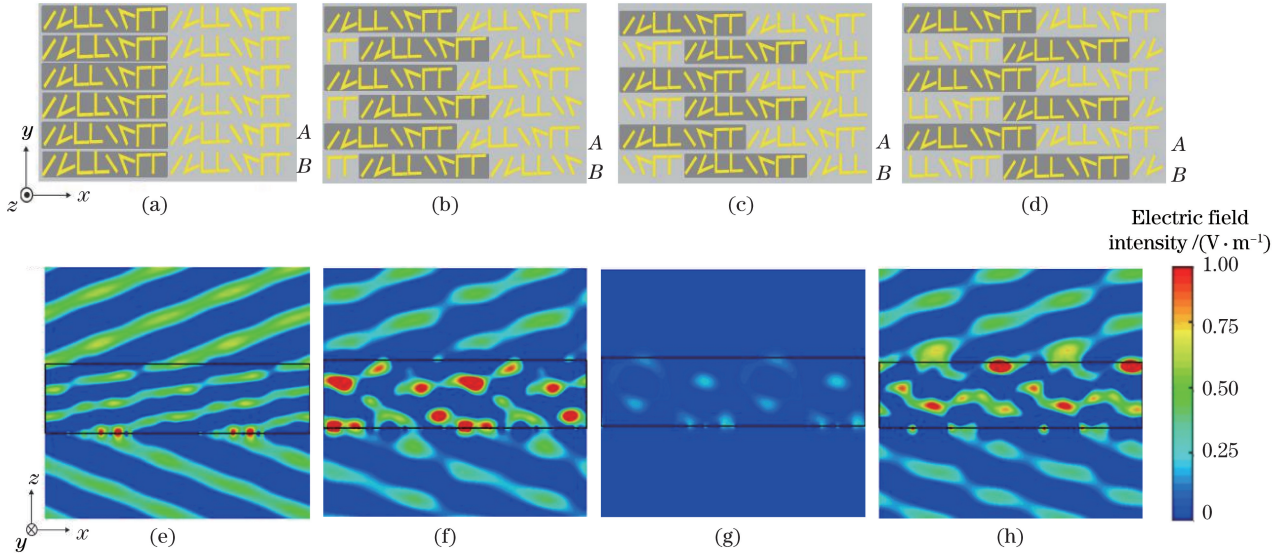


图 2 超表面结构示意图(上)及对应的异常折射交叉偏振光在 x 方向上的电场分布(下)。错开距离:

(a)(e) 0; (b)(f) 1/4 周期; (c)(g) 2/4 周期; (d)(h) 3/4 周期

Fig. 2 Metasurface structures (top) and corresponding electric field distributions of abnormally refracted cross-polarized light in x direction (bottom). Staggered distance: (a)(e) 0; (b)(f) 1/4 period; (c)(g) 2/4 period; (d)(h) 3/4 period

当沿 y 方向偏振,频率为 4.3 THz 的 TE 光从结构背面垂直入射时,异常折射交叉偏振光在 x 方向上的电场分布如图 2(e)~(h)所示。在图 2(e)~(h)中,以介电常数为 3.5,厚度为 $100 \mu\text{m}$ 的聚酰亚胺薄膜为基底,TE 光沿 z 轴正方向从聚酰亚胺薄膜背面垂直入射。从图 2(e)可以看出,两个超晶胞未错开时其偏振转换效果最好,得到的异常折射的光强最大;图 2(f)、(h)显示,当两个超晶胞错开距离为 1/4 周期和 3/4 周期时,电场强度一致,对应的偏振转换效率和异常折射光强相比于未错开时略有下降。图 2(g)显示,当两个超晶胞错开距离为 2/4 周期时,对应的电场强度接近 0,无偏振转换效果。另外,从图 2(e)~(h)可以看出,本文提出的结构对于反射光束也存在类似透射的振幅调制效果,但由于反射光束不便测量,故在此不作过多讨论。

由理论计算可知,对于图 2(a)~(d)四个结构,其出射面上的平均光强依次为 $I_0, \frac{I_0}{2}, 0, \frac{I_0}{2}$, 仿真得到的电场强度与(2)式的计算结果一致。模拟仿真的结果证明了利用所设计的 V-形梯度超表面可以

实现交叉偏振异常折射,利用 V-形结构周期单元间的错位排列实现了相位干涉,可以对异常折射光振幅进行调节。基于以上计算结果,对错开超表面结构及特性进行实验验证。

3 结构制备

首先采用电子束蒸发镀膜机在 $100 \mu\text{m}$ 厚的柔性聚酰亚胺膜上沉积 $0.2 \mu\text{m}$ 厚的铜。然后用匀胶机以 $4000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速将正型光刻胶 SUN-115P 涂覆在铜膜上,旋涂时间为 30 s。接着用烘箱在 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘烤 60 s,利用紫外光刻技术将 V-形天线阵列的图案从掩模板上转移到光刻胶表面,再用烘箱在 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘烤 90 s。随后,将聚酰亚胺膜置于 SUN-238D 显影液中 4 s,再用反应离子刻蚀机刻蚀曝光部分的铜膜,用丙酮浸泡去除未曝光部分的光刻胶,最后得到 V-形铜天线结构。图 3 是四个 V-形铜天线超表面结构。

4 特性测量

测量时采用中国科学院上海微系统与信息技术

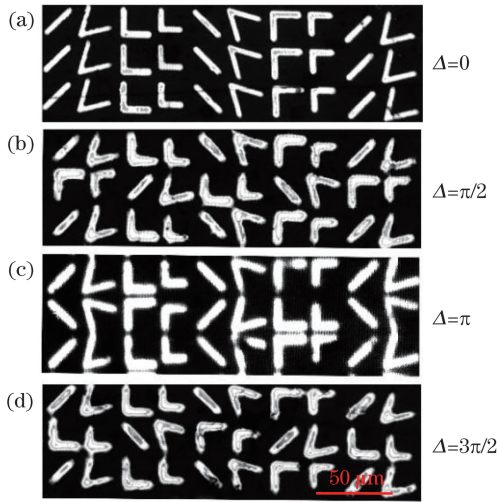


图 3 V-形错位超表面结构显微图
Fig. 3 Micrograph of V-shaped staggered metasurface structure

研究所自主研制的 THz-QCL(太赫兹-量子级联激光器)作为光源。该激光器支持 1.9~5.0 THz 的单模或多模输出,并支持连续波和脉冲波操作,脉冲宽度为 0.2 μs 至直流电,重复频率范围是 100 Hz~100 kHz。实验中所使用的工作频率是 4.3 THz,输出功率为 230 mW。在探测端,采用俄罗斯 Tydex 公司生产的 Golay Cell 太赫兹探测器测量脉冲,其工作波长为 0.3~8000 μm,光学响应的典型值为 105 V·W⁻¹,响应时间为 30 ms。入射光是沿 y 方向偏振的 TE 光,由抛物镜聚焦后垂直照射在固定于支架上的样品上。Golay Cell 太赫兹探测器置于以样品为圆心,半径为 25 cm 的圆形手动旋转盘上,在 xy 平面上旋转探测器以检测透射信号,探测器旋转范围从正对样品到偏离样品±30°。为了方便比较本文设计的不同超表面结构对振幅的调制作用,把测量数据进行归一化处理(异常折射光的强度值除以入射光的强度值),结果如图 4 所示。对于沿 y 方向偏振,频率为 4.3 THz 的 TE 正入射光,可以得到位于 0°的共偏振光和位于 20°的异常交叉偏振光。当超晶胞单元错开距离分别为 0,1/4,2/4,3/4 周期时,位于 20°的异常交叉偏振光的强度分别为入射光强度的 3.6%,1.7%,0.17%,1.9%。每个超晶胞结构由 8 个单元组成,共同分担 2π 的相位,当两个超晶胞之间的错开距离依次为 0,1/4,2/4,3/4 周期时,交错的两个超晶胞单元出射的异常偏振光之间分别有 0,π/2,π,3π/2 的相位差。通过(2)式计算得到的异常折射光强 I 分别为 $I_0, \frac{I_0}{2}, 0, \frac{I_0}{2}$ 。测量与计算得到的比值都约为 2:1:0:1,测量结果

跟理论计算结果一致。

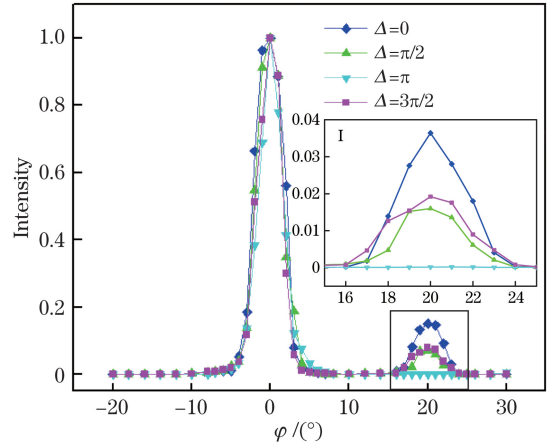


图 4 对应图 3(a)~(d)归一化透射谱线。

插图 I 为异常折射透射的局部放大图

Fig. 4 Normalized transmission curves corresponding to Figs. 3 (a)–(d). Illustration I is partial magnification of anomalous refractive transmission

上述结果表明,基于广义 Snell 定理,利用相位梯度超表面可实现正常透射光与异常折射光的分离,其中异常折射光的传播方向可通过 V-形结构单元的几何参数并依据公式 $\varphi = \arcsin\left[\frac{n_i}{n_t} \sin(\theta) + \frac{\lambda_0}{n_t p}\right]$ 进行设计。尤其是对于异常折射光的振幅,可以通过改变周期单元间的横向距离实现调节,使所设计的振幅调控器件在 THz 成像、传感等方面的实际运用更具有操控性。利用这种方法可以实现光束的偏振控制与分离,通过调整结构的参数,实现聚焦、发散甚至全息成像等功能。另外,所设计的结构性能只取决于结构的几何参数,因此可以很好地避免温度、气压等环境因素带来的干扰,具有很好的稳定性。另外,利用所提方法并结合微电机系统技术来控制周期单元间的错位距离,将来有可能获得动态可调的偏振转换器件。针对金属制备的超表面偏振转换器件存在转换效率低下的问题,可通过改用介质超材料,使用低损耗材料作为衬底,或者设计更加紧凑的结构等方法来提高效率,从而进一步加强错位超表面振幅调控在实际设计中的应用。

5 结 论

利用轻薄的柔性基底超表面,在亚波长尺度下通过梯度超表面对光的振幅进行调控。当 4.3 THz 的 TE 光垂直入射到所设计的 V-形天线超表面上时,可以同时得到正常透射的共偏振光及异常折射角为 20°的交叉偏振光。在此基础上,为了实现对

异常折射交叉偏振光振幅的调控,利用相位干涉的原理,通过理论计算和模拟仿真,对 V-形结构周期单元间的错位进行了排列设计。实验结果表明,当 V-形结构周期单元间横向错开距离为 0, 1/4, 2/4, 3/4 周期时,测量得到的异常折射光强分别为入射光强的 3.6%, 1.7%, 0.17%, 1.9%。研究结果丰富了相位、偏振态和振幅的调控方式,对进一步促进超表面结构在 THz 检测、调控等领域的实际应用具有一定意义。

参 考 文 献

- [1] Liu K, Brown M G, Saykally R J. Terahertz laser vibration-rotation tunneling spectroscopy and dipole moment of a cage form of the water hexamer[J]. *The Journal of Physical Chemistry A*, 1997, 101(48): 8995-9010.
- [2] Zhang X B, Shi W. Study of imaging system based on the tunable terahertz wave source with quasi-Gaussian beam output[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(8): 4984-4990.
张显斌, 施卫. 基于可调谐准高斯波束太赫兹源的成像系统研究[J]. *物理学报*, 2008, 57(8): 4984-4990.
- [3] Zhang Z W, Wang K J, Lei Y, et al. Non-destructive detection of pigments in oil painting by using terahertz tomography[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015, 58(12): 124202.
- [4] Liu S D, Leong E S P, Li G C, et al. Polarization-independent multiple Fano resonances in plasmonic nonamers for multimode-matching enhanced multiband second-harmonic generation[J]. *ACS Nano*, 2016, 10(1): 1442-1453.
- [5] He X J, Yao Y, Zhu Z H, et al. Active graphene metamaterial absorber for terahertz absorption bandwidth, intensity and frequency control[J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(4): 1031-1042.
- [6] Gingras L, Cui W, Schiff-Kearn A W, et al. Active phase control of terahertz pulses using a dynamic waveguide[J]. *Optics Express*, 2018, 26(11): 13876-13882.
- [7] Deng L, Zhang Y Y, Zhu J F, et al. Wide band circularly polarized reflectarray using graphene-based Pancharatnam-Berry phase unit-cells for terahertz communication[J]. *Materials*, 2018, 11(6): 956.
- [8] Lan J X, Cao X Y, Gao J, et al. Novel design of microstrip antenna array with low scattering performance[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(3): 034101.
兰俊祥, 曹祥玉, 高军, 等. 一种新型的低散射微带天线阵设计[J]. *物理学报*, 2019, 68(3): 034101.
- [9] Li Q, Yao R, Shan J X, et al. A preliminary study on THz imaging and image enhancement based on thermal imager[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(s2): 275-277.
李琦, 姚睿, 单纪鑫, 等. 基于热像仪的太赫兹成像及图像增强初步研究[J]. *光学学报*, 2008, 28(s2): 275-277.
- [10] Li X, Bai Y, Li N, Liu P, et al. Absorption of laser plasma in competition with oscillation currents for a terahertz spectrum[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(1): 114-117.
- [11] Postnikov A V, Moldosanov K A. Suggested design of gold-nanoobjects-based terahertz radiation source for biomedical research[J]. *Nanotechnology*, 2018, 29(28): 285704.
- [12] Li J F, Wan T, Wang T F, et al. Electrons leakage from upper laser level to high energy levels in active regions of terahertz quantum cascade lasers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(2): 021101.
李金锋, 万婷, 王腾飞, 等. 太赫兹量子级联激光器中有源区上激发态电子向高能级泄的研究[J]. *物理学报*, 2019, 68(2): 021101.
- [13] Zhang Z Z, Li H, Cao J C. Ultrafast terahertz detectors[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(9): 090702.
张真真, 黎华, 曹俊诚. 高速太赫兹探测器[J]. *物理学报*, 2018, 67(9): 090702.
- [14] Chen H T, Taylor A J, Yu N F. A review of metasurfaces: physics and applications[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2016, 79(7): 076401.
- [15] Aieta F, Kats M A, Genevet P, et al. Multiwavelength achromatic metasurfaces by dispersive phase compensation[J]. *Science*, 2015, 347(6228): 1342-1345.
- [16] Balthasar M J P, Rubin N A, Devlin R C, et al. Metasurface polarization optics: independent phase control of arbitrary orthogonal states of polarization[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(11): 113901.
- [17] Yu N F, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces[J]. *Nature Materials*, 2014, 13(2): 139-150.
- [18] Aieta F, Kabiri A, Genevet P, et al. Reflection and refraction of light from metasurfaces with phase discontinuities[J]. *Journal of Nanophotonics*, 2012, 6(1): 063532.
- [19] Khaidarov E, Hao H F, Paniagua-Dominguez R, et al. Asymmetric nanoantennas for ultrahigh angle broadband visible light bending[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(10): 6267-6272.
- [20] Aieta F, Genevet P, Kats M A, et al. Aberration-free ultrathin flat lenses and axicons at telecom

- wavelengths based on plasmonic metasurfaces [J]. Nano Letters, 2012, 12(9): 4932-4936.
- [21] Khorasaninejad M, Chen W T, Devlin R C, et al. Metalenses at visible wavelengths: diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging [J]. Science, 2016, 352(6290): 1190-1194.
- [22] Devlin R C, Ambrosio A, Wintz D, et al. Spin-to-orbital angular momentum conversion in dielectric metasurfaces [J]. Optics Express, 2017, 25(1): 377-393.
- [23] Pfeiffer C, Zhang C, Ray V, et al. High performance bianisotropic metasurfaces: asymmetric transmission of light [J]. Physical Review Letters, 2014, 113(2): 023902.
- [24] Zhou L, Zhao G Z, Li X N. Broadband terahertz vortex beam generation based on metasurface of double-split resonant rings [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(10): 108701.
周璐, 赵国忠, 李晓楠. 基于双开口谐振环超表面的宽带太赫兹涡旋光束产生 [J]. 物理学报, 2019, 68(10): 108701.
- [25] Plum E, Zhou J, Dong J, et al. Metamaterial with negative index due to chirality [J]. Physical Review B, 2009, 79(3): 035407.
- [26] Wang J L, Liu Y, Chen H M. Design of terahertz polarization beam splitter based on self-collimating effect of photonic crystal [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0423001.
- [27] Dong C, Li B, Li H X, et al. Polarization-insensitive magnetic quadrupole-shaped and electric quadrupole-shaped Fano resonances based on a plasmonic composite structure [J]. Chinese Physics Letters, 2016, 33(7): 074201.
- [28] Khorasaninejad M, Ambrosio A, Kanhaiya P, et al. Broadband and chiral binary dielectric meta-holograms [J]. Science Advances, 2016, 2(5): e1501258.
- [29] Deng Z L, Deng J H, Zhuang X, et al. Facile metagrating holograms with broadband and extreme angle tolerance [J]. Light: Science & Applications, 2018, 7(1): 78.
- [30] Deng Z L, Deng J H, Zhuang X, et al. Diatomic metasurface for vectorial holography [J]. Nano Letters, 2018, 18(5): 2885-2892.
- [31] Duan X Y, Chen S Q, Liu W W, et al. Polarization-insensitive and wide-angle broadband nearly perfect absorber by tunable planar metamaterials in the visible regime [J]. Journal of Optics, 2014, 16(12): 125107.
- [32] Ra'di Y, Simovski C, Tretyakov S. Thin perfect absorbers for electromagnetic waves: theory, design, and realizations [J]. Physical Review Applied, 2015, 3(3): 037001.
- [33] Li X, Ma X L, Luo X G. Principles and applications of metasurfaces with phase modulation [J]. Opto-Electronic Engineering, 2017, 44(3): 255-275, 376.
李雄, 马晓亮, 罗先刚. 超表面相位调控原理及应用 [J]. 光电工程, 2017, 44(3): 255-275, 376.
- [34] Bomzon Z, Biener G, Kleiner V, et al. Radially and azimuthally polarized beams generated by space-variant dielectric subwavelength gratings [J]. Optics Letters, 2002, 27(5): 285-287.