



广义折反射定律

赵泽宇^{1,2}, 蒲明博¹, 王彦钦¹, 罗先刚^{1*}

¹中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 成都 610209;

²吉林大学电子科学与工程学院, 长春 130012

摘要: 折射和反射是波动传播时的基本现象, 光波、电磁波和声波等均可被材料界面折射和反射。近来研究发现, 通过在界面上制备人为设计的亚波长结构阵列, 可改变传统折射和反射行为, 为成像、电磁/几何外形解耦、全息显示等技术提供新的手段。本文综述了近年来折反射定律研究取得的进展, 介绍了不同材料体系中波的折反射行为, 阐述了相关的基本理论和具体应用。最后, 结合本课题组的最新结果, 分析了现有研究存在的不足, 展望了本领域未来的发展趋势。

关键词: 表面等离子体; 超构材料; 超构表面; 广义折反射定律

中图分类号: O485

文献标志码: A

The generalized laws of refraction and reflection

Zeyu Zhao^{1,2}, Mingbo Pu¹, Yanqin Wang¹ and Xiangang Luo^{1*}

¹State Key Laboratory of Optical Technologies on Nano-Fabrication and Micro-Engineering, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China; ² College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China

Abstract: The refraction and reflection are basic phenomena in the propagation of all kinds of waves, such as light waves, electromagnetic waves and acoustic waves, when they encounter the interface between different kinds of materials. Recently, it is discovered that the traditional optical laws regarding refraction and reflection can be rewritten when artificially designed subwavelength arrays are fabricated on the interfaces. The revised laws provide promising alternatives to achieve imaging, multi-physics decoupling and holographic display. Here we review the recent progresses in this emerging topic, including the refraction and reflection behavior in various materials configurations, the fundamental theories and practical applications. Finally, based on our recent results, the shortcomings of current researches are analyzed with a look towards the future trends of the overall area.

Keywords: plasmonics; metamaterial; metasurface; generalized laws of refraction/reflection

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.02.001

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, **44**(2): 129–139

1 引言

反射和折射是光波、电磁波等波动在界面上的基本行为, 相应的定律早在数百年乃至数千年前已被人们认识到^[1-2]。根据光的反射定律, 入射角与反射角相

等, 因而光滑的平面(常用材料包括铜、银、铝等金属)可作为反射镜, 在各种光学和电磁系统中具有广泛应用。比如, 利用低频信号经过电离层的反射可以探测数千公里外的飞行器; EAST 射电望远镜可利用其大口径可变形球面反射镜进行深空探测。

折射定律一般被认为是 Snell 于 1621 年发现的, 此后几百年里成为了折射光学的基础。Snell 定律指出, 当光线斜入射到两种材料交界面处, 折射光传播

收稿日期: 2016-11-21; 收到修改稿日期: 2017-01-07

*E-mail: lxxg@ioe.ac.cn

时将偏离原始方向,且偏离量取决于两种材料折射率的差异。由于 Snell 定律的严格限制,传统光学设计不得不依赖于曲面外形以及透镜材料的选择,导致相应的器件与系统体积重量大,难以按比例缩放到集成光学系统中^[3-4]。

随着负折射率超构材料(简称超材料)的预测和实现,近年来折射/反射现象以及相应的定律重新获得了人们的极大关注。在正折射和负折射材料的相邻界面上,入射光线和折射光线不再分居法线两侧,从而用一块简单的负折射率材料平板即可实现完美成像(严格分析需要采用衍射理论并考虑倏逝波的贡献^[5-6])。值得注意的是,关于负折射材料的研究并非一帆风顺,期间争议颇多^[7]。尽管人们最终确认了负折射理论的正确性,但实际上负折射现象并不仅仅存在于正/负两种材料的交界面处^[8]。以常见的双折射晶体为例,当入射光的入射方向与晶体的主轴成一定夹角,经典的 Snell 定律便不能恰当描述所有偏振波的折射行为。此时,需要采用一种广义 Snell 定律分别分析材料中相速度和群速度的传播方向^[8]。

在普通折射现象中,两种材料界面上的相位不存在跃变,因此可通过相位匹配条件推导 Snell 定律。在材料界面上人为施加随位置变化的梯度相位,可改写传统折射定律^[3],任意控制折射方向^[9]。此外,与传统的广义 Snell 定律不同,引入梯度相位后反射定律也不再适用,反射方向将遵守新的规则。由于这种相位梯度层的厚度远小于波长,一般被称作超构表面(简称超表面)^[10-13],相应的定律也被称为超构表面辅助的折反射定律(metasurface-assisted law of refraction and reflection, MLRR)^[3]。

在 MLRR 中,控制折反射方向的关键在于恰当地引入相位梯度。目前,国际上主要有三种引入相位梯度的方法^[14]: 其一是梯度折射率材料,通过在空间上改变介质光栅的占空比^[15],或利用几何尺寸渐变的超构材料^[16]都可引入类似的相位梯度。由于普通介质材料或等效超构材料的折射率有限,为了实现 360°的相位变化,材料的厚度需要接近甚至远大于波长。第二种引入相位梯度的方法利用了金属-介质界面上表面等离子体激元(surface plasmon polaritons, SPP)的短波长特性,通过将宽度渐变的纳米狭缝垂直排列,可在不同位置局地地引入任意相位差^[17]。由于 SPP 的等效波长极短,对应的模式折射率远大于普通材料,因而可使器件的厚度远小于波长。第三种引入相位梯度的

方法利用了超构表面中的几何相位。不同于在传播路径上的累积相位,几何相位只取决于平面结构的几何形状和尺寸,与材料的厚度无关^[9, 18-19]。因此,这种器件仅需远小于波长的厚度即可产生任意相位梯度,实现对折射和反射方向的精确调控。值得注意的是,几何相位与光子的自旋-轨道相互作用密切相关^[20-21],在量子信息处理等方面也具有重要意义^[22]。另外,结合几何相位和普通传输相位,还可实现分数轨道角动量(OAM)产生等特殊功能^[23]。

MLRR 为新型平面光学和电磁器件的设计提供了简单有效的工具,也可推广到更复杂的应用场合^[24]。比如,通过超构表面构建复杂的梯度相位分布,可将入射光折射到指定的位置,实现三维彩色显示^[25];通过调控表面的反射可使入射能量不返回到原方向,极大地减小目标的光学或雷达散射截面^[26-27]。更广义地讲,超构表面还可改变折射和反射电磁波的振幅、偏振态,改写 Fresnel 公式和传统吸收理论^[3-4]。

2 均匀材料中的折射和反射定律

根据相位匹配条件,可以推导出两种界面上的折反射公式。考虑两种折射率分别为 n_1 和 n_2 的材料,入射面为 xz 平面,入射、反射和折射电磁波分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_i &= \mathbf{E}_0 \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}), \\ \mathbf{H}_i &= \mathbf{H}_0 \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_r &= r\mathbf{E}_0 \exp(i\mathbf{k}_r \cdot \mathbf{x}), \\ \mathbf{H}_r &= r\mathbf{H}_0 \exp(i\mathbf{k}_r \cdot \mathbf{x}); \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_t &= t\mathbf{E}_0 \exp(i\mathbf{k}_t \cdot \mathbf{x}), \\ \mathbf{H}_t &= t\mathbf{H}_0 \exp(i\mathbf{k}_t \cdot \mathbf{x}), \end{aligned} \quad (3)$$

其中: r, t 分别为反射和透射系数。根据边界上切线电磁场的连续条件,可知

$$\mathbf{k}_{\parallel} = \mathbf{k}_{r\parallel} = \mathbf{k}_{t\parallel}. \quad (4)$$

若 θ_i, θ_r 和 θ_t 分别为入射波束、反射波束和折射波束与法线的夹角,则有

$$n_1 k_0 \sin \theta_i = n_1 k_0 \sin \theta_r = n_2 k_0 \sin \theta_t, \quad (5)$$

化简可得经典的反射定律和折射定律:

$$\sin \theta_i = \sin \theta_r = (n_2 / n_1) \sin \theta_t. \quad (6)$$

如图 1(a)、1(b)所示,光滑界面上的反射波束与入射波束分居法线两侧,且入射角与反射角相等。当两种材料的折射率符号相同,折射波束与入射波束分居法线两侧;当一种材料为正折射率,另一种为负折射率时,折射波束与入射波束位于法线同侧,此即所谓负折射现象。

值得注意的是,负折射现象并非局限于负折射材

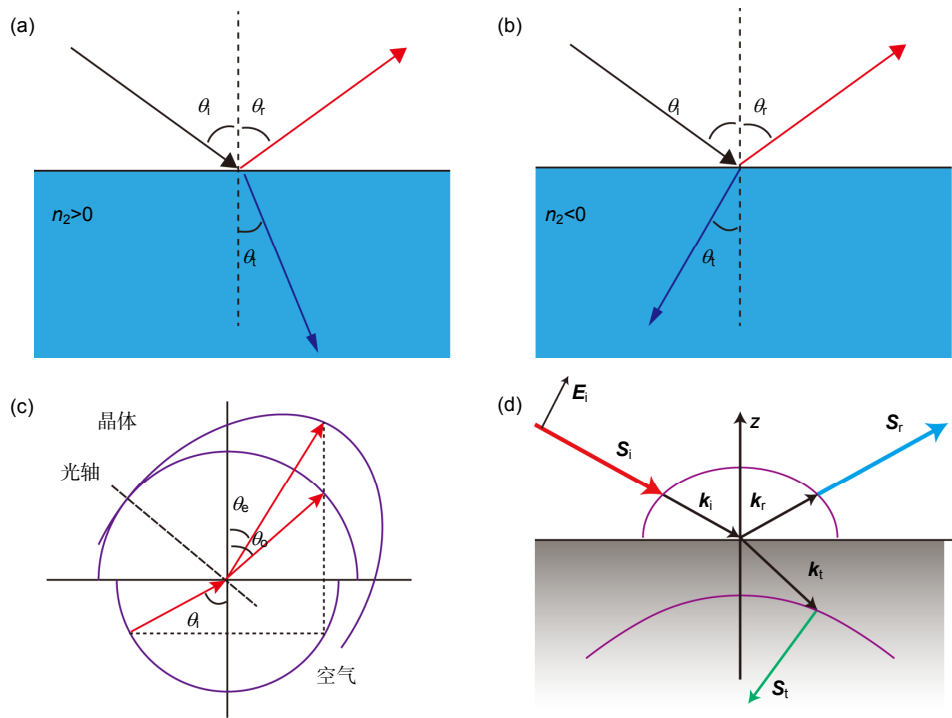


图 1 均匀材料界面上的折反射定律. (a) 正常折反射. (b) 正折射材料和负折射材料界面的折反射. (c) 双折射晶体中的双折射现象. (d) 双曲色散材料中的异常折射^[28].

Fig. 1 The laws of refraction and reflection at the interfaces between two homogenous materials. (a) Normal refraction and reflection. (b) The refraction and reflection at the interface between double positive and double negative materials. (c) The refraction and reflection at the interface between normal material and birefringent crystal. (d) The abnormal refraction effect associated with hyperbolic materials^[28].

料体系。传统各向异性材料中也可能发生负折射现象，并且各向异性的负折射材料中也能产生正折射^[8]。如图 1(c)所示，在普通双折射晶体中，由于寻常光(o 光)和异常光(e 光)对应的折射率不一样，根据横向波矢量匹配原理，相应的折射角也会发生变化。此外，由于能流的方向沿着色散曲线的法线，即使在正入射时，一般情况下能流方向也会发生偏折。

除了普通双折射晶体外，在某个方向具有负介电常数或负磁导率的双曲色散材料在近年来也得到了广泛的研究。如图 1(d)所示，当光波从普通材料入射到双曲材料中时，尽管波矢量的折射方向为正，但能流沿着双曲线的法向传播，产生了明显的负折射效应^[28]。这种负折射行为在超衍射光束控制、超分辨成像和光刻技术中具有重要作用^[28-34]。

3 非均匀材料中的折射和反射定律

3.1 非均匀超构材料

非均匀超构材料指材料的折射率在空间上渐变，

尽管它是一个新兴研究方向，但其基础——梯度折射率光学——实际上已有百余年的研究历史。早在 19 世纪中叶，Maxwell 就已研究了多种具有梯度折射率的光学器件^[35]。

梯度折射率器件可被用作平面透镜，替代传统曲面光学元件。如图 2(a)所示，当一块平板中的折射率在垂直于光轴的方向为

$$n^2(y) = n_0^2(1 - \alpha^2 y^2) \quad (7)$$

时，光线在平板中的传播轨迹可表示为

$$\theta(z) = -y_0 \alpha \sin \alpha z + \theta_0 \cos \alpha z, \quad (8)$$

其中： α 为常数， θ 为光线与 z 轴所成的夹角， y_0 和 θ_0 为光线在入射面上的位置和夹角。光线在平板中围绕中心振荡，且两个峰值间距(即周期)为 $2\pi/\alpha$ 。若一束光线入射，则它们共同交点的间距为 π/α 。上述梯度折射率平板可用于聚焦或成像^[36]，为传统透镜设计增加了更多的自由度。

2006 年以来，随着变换光学的兴起^[37-38]，梯度折射率超构材料的研究取得了许多新进展，出现了诸如

隐身斗篷^[39]、隐身地毯^[40]和双曲透镜^[41-45]等奇异电磁器件。如图 2(b)所示,通过改变介质中亚波长结构的尺寸,可人为调节每个单元的等效折射率,构建具有平坦聚焦面的三维龙伯透镜^[46-47]。如图 2(c)所示,当圆柱形器件的折射率分布为

$$\varepsilon(r) = \begin{cases} \varepsilon_0 & , \rho > R \\ \varepsilon_0 \left(\frac{R}{\rho}\right)^2 & , R_c < \rho < R \\ \varepsilon_c + i\gamma & , \rho < R_c \end{cases} \quad (9)$$

时,器件被称为“人造黑洞”^[48],照射到器件边缘的电

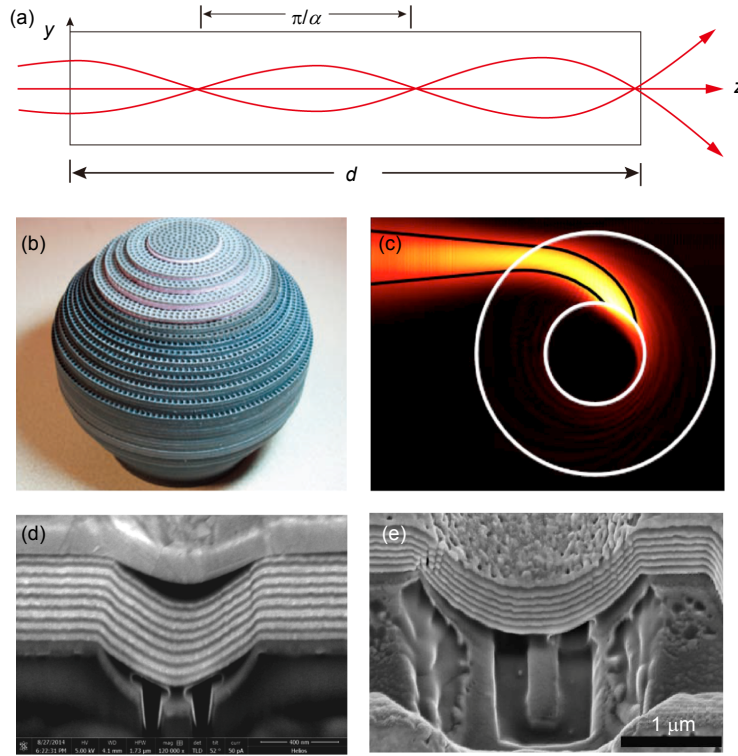


图 2 梯度折射率光学器件。(a) 基于梯度折射率板的平面透镜。(b) 微波段具有平坦聚焦面的三维龙伯透镜^[47]。(c) 人造黑洞中的波束传播^[48]。(d) 针对 365 nm 波长设计的双曲透镜^[44]。(e) 针对 405 nm 波长设计的双曲透镜^[45]。
 Fig. 2 Optical devices based on gradient materials. (a) Flat lens based on gradient index slab. (b) Flattened 3D Luneburg lens in the microwave band^[47]. (c) Light propagation in artificial blackhole^[48]. (d) Fabricated hyperlens designed for $\lambda=365 \text{ nm}$ ^[44]. (e) Hyperlens designed for $\lambda=405 \text{ nm}$ ^[45].

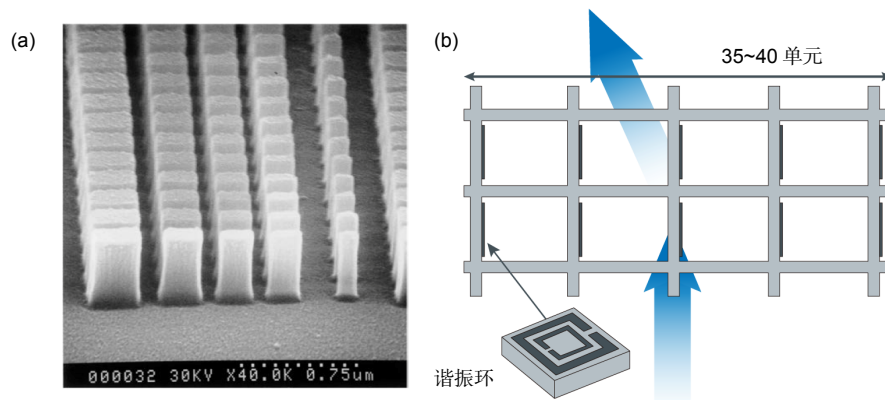


图 3 基于相位折叠的偏折器件。(a) 二维介质光栅,每个周期中结构的尺寸逐渐变化^[15]。(b) 梯度超构材料^[16],厚度方向需要 3~8 个周期。
 Fig. 3 Deflectors based on phase wrapping. (a) 2D dielectric grating with varying sizes in adjacent unit cells^[15]. (b) Gradient metamaterials^[16].

磁波将被逐渐弯曲、吸引到器件内部并被吸收。这种模拟天体行为的能力来自于变换光学与广义相对论的内在联系^[38, 49], 为电磁波的操控提供了前所未有的手段。图 2(d)和 2(e)为两种根据变换光学设计的双曲透镜, 在超衍射光学光刻中具有重要意义^[44-45]。

根据光波相位的折叠原理(相位增加 2π , 波前保持不变), 非均匀折射率材料还可用于构造平面化的超薄光学元件。如图 3(a)和 3(b)分别为基于二维介质光栅结构和开口谐振环的平面偏折器件^[15-16]。通过结构在横向的渐变排布, 可将入射电磁波偏折到任一指定方向。尽管这两种结构不一样, 但它们实现的功能类似, 且都与传统闪耀光栅有类似之处^[24]。然而, 由于结构材料的等效折射率较小, 器件的整体厚度一般接近甚至大于波长。并且, 光波在传播过程中容易在相邻单元之间耦合, 从而恶化器件性能。

3.2 非均匀超构表面

当图 3 中所示的梯度超构材料的等效折射率较高时, 器件厚度能够被大幅压缩, 且可忽略电磁波在相邻单元之间的耦合。此时, 可将问题简化为对梯度相位分布的优化。以下考虑具有相位局域可调属性的非均匀超构表面上的折反射行为。假设超构表面具有线性的相位分布, 则其相位梯度 $\nabla\Phi$ 为常数, 相位分布可写作 $\nabla\Phi \cdot \mathbf{x}$ (\mathbf{x} 位于界面内)。根据类似于式(4)的边界条件匹配可得:

$$\mathbf{k}_{\parallel} \cdot \mathbf{x} + \nabla\Phi \cdot \mathbf{x} = \mathbf{k}_{\text{in}} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{k}_{\parallel} \cdot \mathbf{x}, \quad (10)$$

化简即为“超构表面辅助的折反射定律(MLRR)”表达式^[3, 50-51]:

$$n_1 k_0 \sin \theta_i + \nabla\Phi = n_1 k_0 \sin \theta_r = n_2 k_0 \sin \theta_t, \quad (11)$$

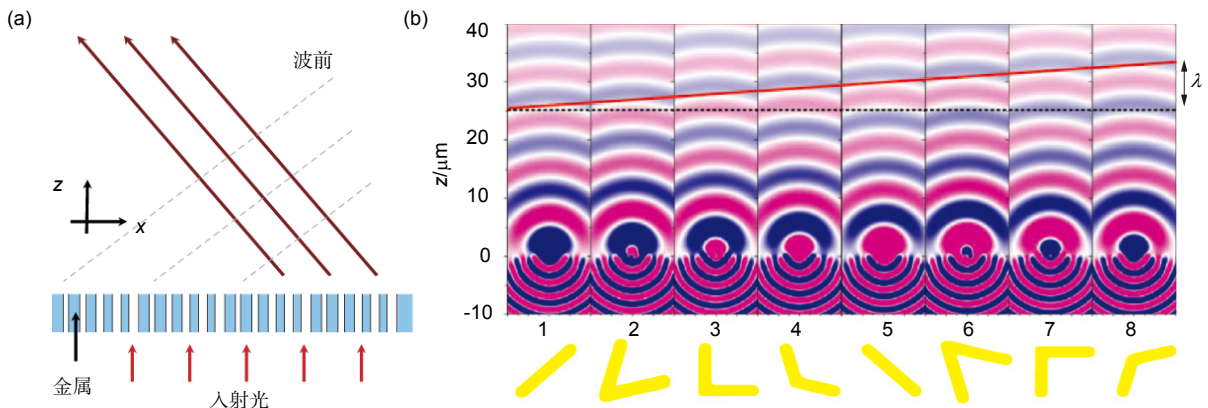


图 4 基于局域相位调控的广义折射定律, 正入射电磁波可被偏折到指定方向。(a) 通过纳米狭缝阵列引入梯度相位^[17], 实现异常偏折。(b) 通过 V 形纳米天线引入梯度相位^[9], 单元结构上的数字为结构的编号。

Fig. 4 Generalized law of refraction. (a) The local phase shift is introduced by the nanoslits array^[17]. (b) The phase shift is produced by the V-shaped nanoantennas^[9].

其中 $\nabla\Phi$ 为超构表面产生的相位梯度, 由超构表面的几何结构和排布方式决定, 并且可通过外部激励实现动态调制。MLRR 使得超构表面可取代传统曲面结构, 并为大口径光学系统提供一种可行的技术途径^[52]。另外, 通过在柔性或可延展衬底上制备亚波长结构, 可赋予平面器件易共形、可拉伸等特性^[3]。

应用 MLRR 的关键在于局域相位调控, 要求相邻单元之间的耦合尽可能小。为了实现这一目的, 提出了基于纳米狭缝的局域相位调控技术。如图 4(a)所示, 通过改变每个金属狭缝的宽度, 可以调节 SPP 在其中的传播常数, 进而控制出射面的相位分布^[17]。金属-介质-金属狭缝中 SPP 的色散关系可写作^[3]

$$\tanh(\sqrt{\beta^2 - \varepsilon_d k_0^2} \frac{w}{2}) = -\frac{\varepsilon_d \sqrt{\beta^2 - \varepsilon_m k_0^2}}{\varepsilon_m \sqrt{\beta^2 - \varepsilon_d k_0^2}}, \quad (12)$$

由此可见, SPP 的传播常数 β 与狭缝宽度 w 密切相关。通过厚度为 d 的狭缝, SPP 的相位延迟可由 $\Phi = \beta d + \alpha$ 计算, 其中 α 是 F-P 腔效应引起的相位修正:

$$\alpha = \arg[1 - (\frac{1 - \beta/k_0}{1 + \beta/k_0})^2 \exp(i2\beta d)]. \quad (13)$$

除纳米狭缝之外, 还有许多亚波长结构可实现局域相位调控^[9, 18, 53-54]。如图 4(b)所示, 通过改变 V 形金属纳米天线的夹角和尺寸、朝向, 可使线偏振电磁波在转换为交叉偏振的同时, 在 $[0, 2\pi]$ 之间产生所需的任意相移。这种交叉偏振转化导致器件效率受限, 但可通过反射式、多层结构或相干控制得到改善^[55-57]。值得注意的是, 对于圆偏振响应的器件, 异常折射现象与光子自旋-霍尔效应具有本质联系^[21]。

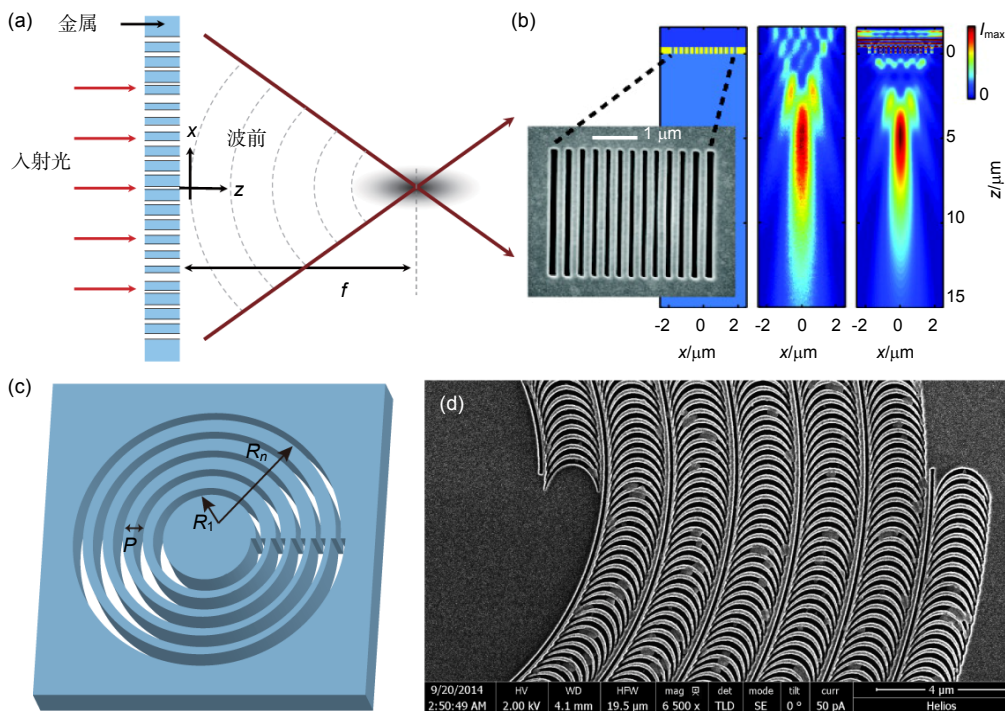


图5 基于纳米狭缝结构的平面透镜. (a) 透镜原理示意图^[17]. (b) 可见光波段的实验验证^[58], 从左至右分别为样品电镜图、实验测试和 FDTD 仿真结果. (c) 基于变形狭缝阵列的分数轨道角动量产生器件示意图^[23]. (d) 基于悬链线狭缝的高阶 Bessel 光束产生器电镜图^[18, 59].

Fig. 5 Flat lenses based on nanoslits array. (a) Schematic of the flat lens^[17]. (b) Experimental demonstration of (a) in the visible range. From left to right: SEM image, experimental and simulated results^[58]. (c) Fractal angular momentum generators based on deformed nanoslits^[23]. (d) High-order Bessel beam generators based on catenary nanostructures^[18, 59].

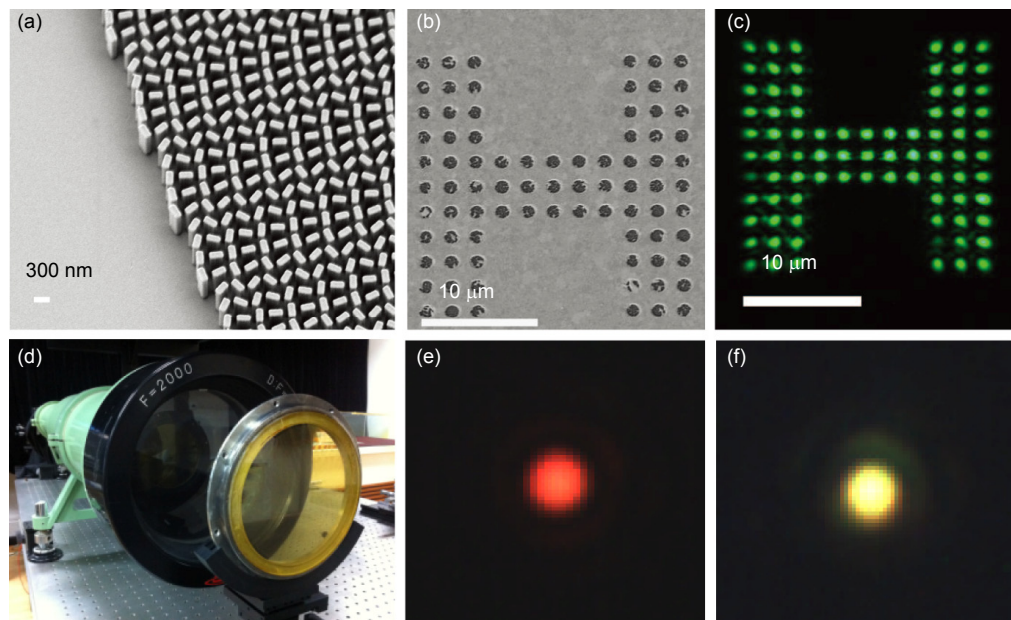


图6 用于平面成像的广义折射定律. (a) 超构表面显微物镜的电镜图^[60], 标尺: 300 nm. (b) 字符“H”的电镜图^[60], 标尺: 10 μm. (c) 成像效果^[60], 标尺: 10 μm. (d) 望远系统照片^[3]. (e),(f) 红光(波长 632.8 nm)及白光星点图^[3].

Fig. 6 Generalized refraction law for planar imaging. (a) SEM image of the metasurface objective^[60]. Scale bar: 300 nm. (b) SEM image of the object “H”^[60]. Scale bar: 10 μm. (c) Image of the object^[60]. Scale bar: 10 μm. (d) Photograph of the metasurface-based telescope^[3]. (e), (f) Focal spots for red light (left, $\lambda=632.8$ nm) and white (right) light^[3].

如图 5 所示, 通过将纳米狭缝变形, 梯度亚波长结构可实现多种局域相位调控, 并用于构建平面透镜、OAM 产生器、高阶 Bessel 光束产生器等一系列新型光学器件^[3, 17, 18, 58-59]。与基于负折射率材料的完美透镜不同, 基于 MLRR 的平面透镜可以将电磁波聚焦到任意指定距离^[58-63], 在显微、望远等领域具有广泛的应用前景。图 6(a)所示为一种基于超构表面的物镜^[60], 每个单元由旋转的各向异性纳米介质柱构成, 通过光子的自旋-轨道相互作用实现局域相位调控。该物镜的放大倍率最高可达 170 倍, 图 6(b)和 6(c)分别为离散物体及其成像效果。图 6(d)为基于平面纳米结构的望远成像系统^[3], 图 6(e)和 6(f)分别为红光和白光的成像星点图, 从其衍射环可见像质已接近衍射极限。

3.3 基于 MLRR 的虚拟赋形和全息显示技术

除了在平面透镜、望远和显微等方面具有广泛应用前景, MLRR 在电磁隐身、全息显示、激光分束、轨道角动量调控等领域^[18, 25, 27, 59, 64-65]也展现了独特的优势, 可解决几何外形和电磁外形耦合等许多传统技

术难以解决的问题。

如图 7(a)所示, 在三维任意曲面上设计具有反射相位调制能力的超构表面, 通过调节每个坐标点处光学天线的反射相位值, 对反射波的相位进行补偿, 可使反射波的波前等效为平面镜反射的波前, 即把任意曲面等效为镜面, 从而实现任意曲面下物体的电磁隐身。图 7(b)为通过光学干涉和原子力显微镜测试得到的样品表面形貌, 可见当物体表面覆盖光学天线后, 通过干涉的方法已经测不出物体的真实形状。

在隐身应用中, 响应带宽是一个关键指标, 传统基于变换光学的隐身技术之所以难以实用, 在很大程度上也是受限于其固有的窄带特性^[66]。随着色散调控技术^[67-69]以及自旋-轨道相互作用被引入到超构表面的设计中, 超构表面隐身斗篷的工作带宽得以显著拓展。自旋-轨道相互作用指光子的自旋角动量(对应于经典理论中的圆偏振态)和轨道角动量(对应于经典理论中的角向相位梯度)之间相互转化。圆偏振光正入射到一个反射式的半波片后, 其反射场的偏振态将转换

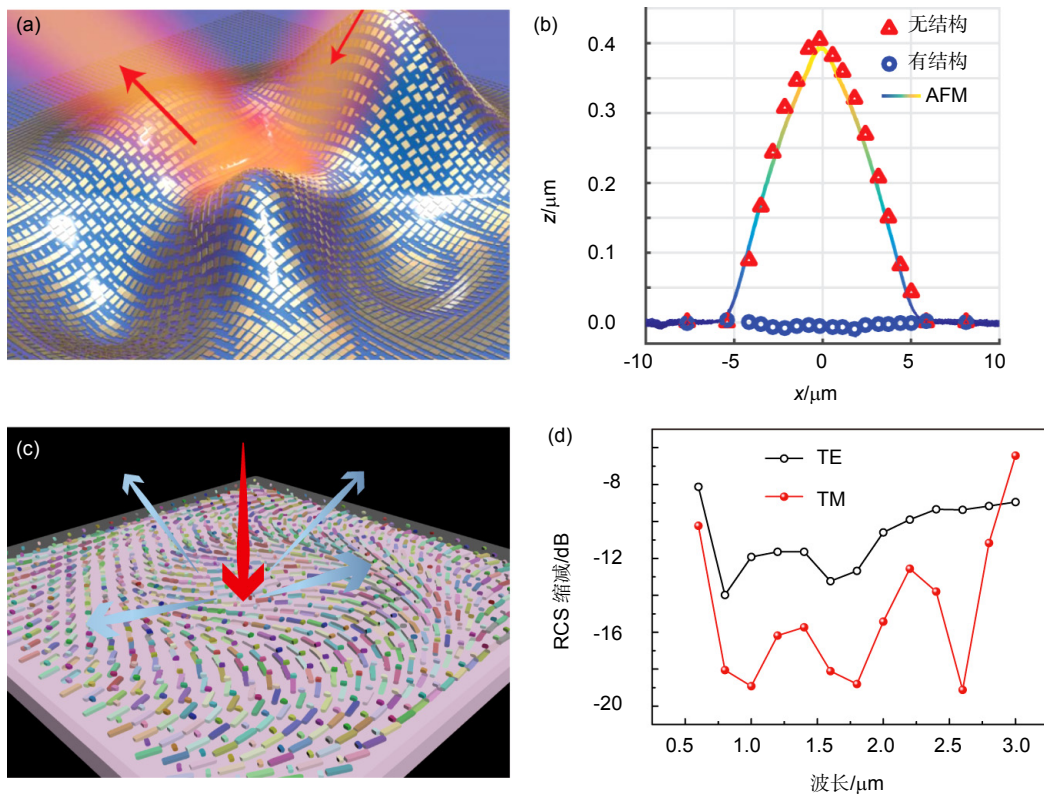


图 7 基于任意反射的虚拟赋形技术。(a) 超薄隐身斗篷示意图^[26]。(b) 隐身效果测试^[26]。(c) 虚拟赋形器件效果图^[27]。(d) RCS 缩减效果^[27]。

Fig. 7 Virtual shaping technologies based on arbitrary reflection. (a) Schematic of the skin cloak^[26]. (b) Measurement of the cloaking performance^[26]. (c) Sketch map of the virtual shaping device^[27]. (d) Simulated radar cross section (RCS) reduction^[27].

为其正交偏振;当该半波片绕其主轴旋转时,反射正交偏振的相位也随之发生线性变化,这种相位变化与波长无关,仅与波片旋转角度有关,因此被称为几何相位^[22-23]。基于几何相位,可实现几何外形与电磁外形解耦。如图 7(c)所示,通过亚波长结构在一个平板上施加径向梯度相位,可将入射的电磁波均匀反射到四周。此时,对于电磁波和探测器而言,该平板的电磁视在外形为圆锥,从而实现了虚拟赋形。图 7(d)中的结果表明:通过对亚波长结构的色散调控,并利用其中光子的自旋-轨道相互作用,可以在大于 5:1 的频带范围内使目标的 RCS 缩减 10 dB 以上^[27]。虚拟赋形技术可以使目标的电磁外形与几何外形解耦,从而突破传统隐身设计中隐身和气动特性面临的矛盾。

将超构表面相位调控器件与离轴全息技术相结合,利用几何相位的宽带相位消色差性能还可实现彩色全息成像^[25]。图 8(a)为基于金属矩孔结构的彩色全息原理图。采用三束不同波长的激光倾斜入射,利用三基色叠加合成的方法,实现了彩色三维全息成像。图 8(b)和 8(c)分别为中国地图和太阳神鸟(出土于四川金沙遗址)的全息图像。

在实际应用中,效率是超构表面设计的重要指标^[70]。除了利用介质谐振和复杂的金属谐振结构提高几何相位型超构表面器件的能量利用率外^[56, 71-72],还可利用反射面来实现高效相位调控。这种方法得到的偏振转化效率和能量利用效率可达到 80%以上,在微波波段甚至可超过 90%^[27, 55]。图 8(d)为采用反射式结构

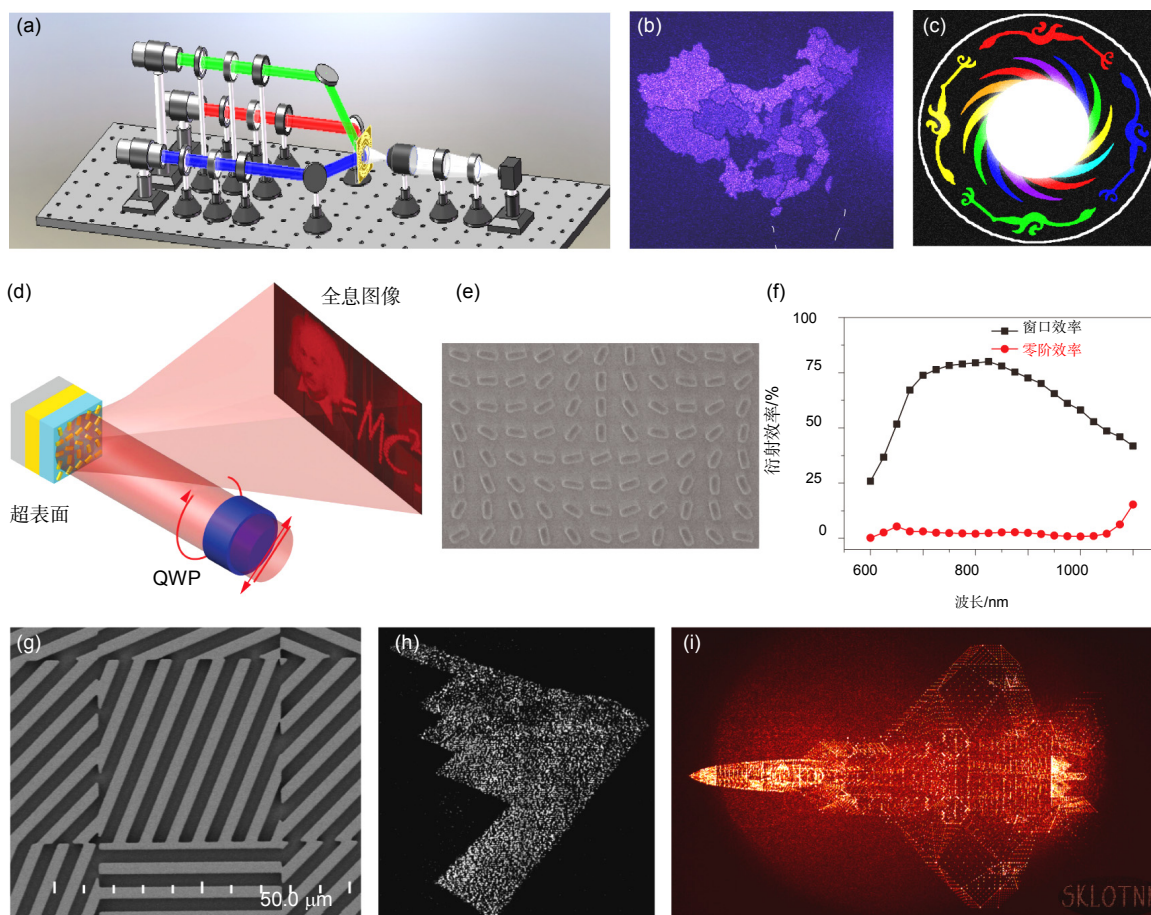


图 8 基于 MLRR 的全息超构表面器件. (a) 离轴彩色全息示意图^[25]. (b) 中国地图的全息效果^[25]. (c) 太阳神鸟的全息效果^[25]. (d) 反射式高效率全息示意图^[70]. (e) 样品电镜图^[70]. (f) 器件的衍射效率^[70]. (g) 红外超构表面电镜图. (h) 红外波段 B-2 飞机的全息图. (i) 可见光波段 F-22 飞机的三维全息图, 右下为实验室英文简称 SKLOTNM.

Fig. 8 Metasurface holographic devices based on MLRR. (a) Schematic of the off-axis full-color holography^[25]. (b) Holographic image of the China map^[25]. (c) Holographic map of the Sun Phoenix^[25]. (d) Schematic of the high-efficiency reflective hologram^[70]. (e) SEM image of the reflective hologram^[70]. (f) Diffraction efficiency of the device shown in (e)^[70]. (g) SEM image of the infrared high-efficiency metasurface. (h) Holographic image of B-2 in the infrared band. (i) 3D holographic image of the F-22 in the visible band.

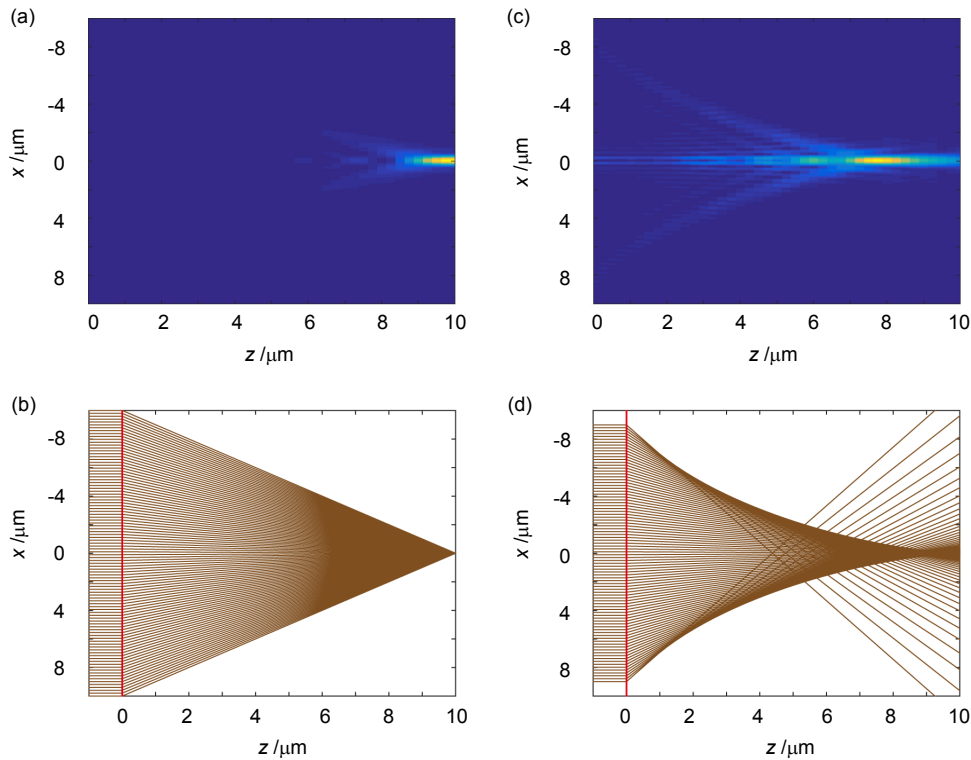


图9 典型非线性相位超表面的光场和光线追迹. (a) 理想聚焦超表面透镜产生的聚焦光场. (b) 理想聚焦超表面对光线的偏折效果, 其中光线越密集的地方光场强度越大. (c) 二次相位超表面透镜产生的聚焦光场. (d) 二次相位超表面透镜对光线的偏折效果.

Fig. 9 Light fields distribution and ray-tracing of typical metasurfaces with nonlinear phase distribution. (a) The focused light fields generated by an ideal metasurface lens. (b) Ray tracing of the ideal focusing lens, where denser lines mean stronger light intensity. (c) Focused light fields generated by a metasurface with quadratic phase. (d) Ray tracing of the quadratic lens.

实现的高效率全息, 其中采用迭代算法计算了爱因斯坦头像的全息图^[70]。该器件在宽波段内具有较高的图像质量和信噪比, 且投影成像角达到 $60^\circ \times 30^\circ$ 。图 8(f) 为该器件在 600~1100 nm 波长范围内实验测试得到的能量利用率。图 8(g) 为红外波段 (10.6 μm) 基于几何相位的反射型全息器件, 其中亚波长光栅的厚度为 2.65 μm, 周期为 4 μm。图 8(h) 为菲涅耳区域的全息图 (通过点源法计算)。图 8(i) 为可见光波段 (632.8 nm) 的反射式全息图, 通过在厚度为 158 nm 的浮雕图形上溅射 100 nm 厚的金属 Au, 可使反射光产生 180° 的相移, 从而实现高效三维全息。

通过全息算法得到的相位分布一般不具有解析表达式, 对其精确处理要借助于衍射理论^[63]。在低阶近似条件下, 可通过求解相位分布对空间坐标的一阶导数得到各个位置处波束的偏折方向, 最终的电磁场分布由各个局域位置处光波的偏折角度共同决定。以一维梯度相位分布为例, 设超表面产生的相位为 $\Phi(x)$, 在 x_0 处入射光 (波数为 k_0) 获得的横向波矢量为 $dk_x =$

$d\Phi(x)/dx$ 。对于正入射光线, 其偏折角度为 $\arcsin(dk_x/d_0)$ 。

图 9 为针对具有非线性相位的超表面透镜, 通过矢量衍射理论和光线追迹两种方法计算的结果, 其中光波波长为 632.8 nm, 透镜焦距 $f=10 \mu\text{m}$ 。图 9(a), 9(b) 中的超表面相位分布为 $\Phi(x) = k_0[(x^2 + f^2)^{1/2} - f]$, 对应于理想聚焦的消球差透镜; 图 9(c) 和 9(d) 中超表面的相位分布为 $\Phi(x) = k_0 x^2 / 2f$, 对应于消球差透镜的傍轴近似, 可用于大视场超分辨聚焦和成像。

4 结论

本文介绍了折反射定律相关的研究历史、基本理论和主要应用。通过梳理近年来发现的现象、提出的理论以及开展的实验工作, 希望厘清现有研究存在的问题以及本领域的发展趋势。在基础研究方面, 我们认为未来亟需解决以下几个关键问题: 首先, 尽管超构表面技术使得大口径平面光学系统成为可能, 但相关的加工误差、多物理场耦合等问题仍不清晰; 其次,

现有超构表面成像技术还存在色差较大、衍射受限等问题,需要在突破折反射定律限制的基础上,进一步突破衍射理论的限制;最后,在折反射定律的动态调控方面,如何将微波段的现有技术^[73-74]拓展到红外和可见光波段仍存在巨大挑战。

基金项目

国家重点基础研究发展计划 973 课题(2013CBA01700), 国家自然科学基金资助项目(61622508, 61575201)。

参考文献

- 1 罗先刚. 亚波长电磁学[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- 2 Luo Xiangang. Subwavelength electromagnetics[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2016, **9**(2): 138–150.
- 3 Luo Xiangang. Principles of electromagnetic waves in metasurfaces[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015, **58**(9): 594201.
- 4 Hong Minghui. Metasurface wave in planar nano-photonics[J]. *Science Bulletin*, 2016, **61**: 112–113.
- 5 Luo Xiangang, Ishihara T. Surface plasmon resonant interference nanolithography technique[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **84**(23): 4780–4782.
- 6 Fang N, Lee H, Sun C, et al. Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens[J]. *Science*, 2005, **308**(5721): 534–537.
- 7 Munk B A. *Metamaterials: critique and alternatives*[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.
- 8 Grzegorzczak T M, Nikku M, Chen X D, et al. Refraction laws for anisotropic media and their application to left-handed metamaterials[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2005, **53**(4): 1443–1450.
- 9 Yu N F, 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.
- 10 Yu N F, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces[J]. *Nature Materials*, 2014, **13**(2): 139–150.
- 11 Luo Xiangang, Pu Mingbo, Ma Xiaoliang, et al. Taming the electromagnetic boundaries via metasurfaces: from theory and fabrication to functional devices[J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2015, **2015**: 204127.
- 12 Sun Shulin, He Qiong, Zhou Lei. Electromagnetic metasurfaces[J]. *Physics*, 2015, **44**(6): 366–376.
孙树林, 何琼, 周磊. 电磁超表面[J]. *物理*, 2015, **44**(6): 366–376.
- 13 Minovich A E, Miroshnichenko A E, Bykov A Y, et al. Functional and nonlinear optical metasurfaces[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, **9**(2): 195–213.
- 14 Xu Yadong, Fu Yangyang, Chen Huanyang. Planar gradient metamaterials[J]. *Nature Reviews Materials*, 2016, **1**(12): 16067.
- 15 Lalanne P, Astilean S, Chavel P, et al. Blazed binary subwavelength gratings with efficiencies larger than those of conventional échelette gratings[J]. *Optics Letters*, 1998, **23**(14): 1081–1083.
- 16 Smith D R, Mock J J, Starr A F, et al. Gradient index metamaterials[J]. *Physical Review E*, 2005, **71**(3): 36609.
- 17 Li Yang, Li Xiong, Pu Mingbo, et al. Achromatic flat optical components via compensation between structure and material dispersions[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 19885.
- 18 Pu Mingbo, Li Xiong, Ma Xiaoliang, et al. Catenary optics for achromatic generation of perfect optical angular momentum[J]. *Science Advances*, 2015, **1**(9): e1500396.
- 19 Ma Xiaoliang, Pu Mingbo, Li Xiong, et al. A planar chiral meta-surface for optical vortex generation and focusing[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 10365.
- 20 Bliokh K Y, Rodríguez-Fortuño F J, Nori F, et al. Spin-orbit interactions of light[J]. *Nature Photonics*, 2015, **9**(12): 796–808.
- 21 Luo Xiangang, Pu Mingbo, Li Xiong, et al. Broadband spin Hall effect of light in single nanoapertures[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, **6**: e16276.
- 22 Anandan J. The geometric phase[J]. *Nature*, 1992, **360**(6402): 307–313.
- 23 Guo Yinghui, Pu Mingbo, Zhao Zeyu, et al. Merging geometric phase and plasmon retardation phase in continuously shaped metasurfaces for arbitrary orbital angular momentum generation[J]. *ACS Photonics*, 2016, **3**(11): 2022–2029.
- 24 Larouche S, Smith D R. Reconciliation of generalized refraction with diffraction theory[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(12): 2391–2393.
- 25 Li Xiong, Chen Lianwei, Li Yang, et al. Multicolor 3D meta-holography by broadband plasmonic modulation[J]. *Science Advances*, 2016, **2**(11): e1601102.
- 26 Ni X J, Wong Z J, Mrejen M, et al. An ultrathin invisibility skin cloak for visible light[J]. *Science*, 2015, **349**(6254): 1310–1314.
- 27 Pu Mingbo, Zhao Zeyu, Wang Yanqin, et al. Spatially and spectrally engineered spin-orbit interaction for achromatic virtual shaping[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 9822.
- 28 Poddubny A, Iorsh I, Belov P, et al. Hyperbolic metamaterials[J]. *Nature Photonics*, 2013, **7**(12): 948–957.
- 29 Guo Yinghui, Pu Mingbo, Ma Xiaoliang, et al. Advances of dispersion-engineered metamaterials[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(1): 3–22.
郭迎辉, 蒲明博, 马晓亮, 等. 电磁超构材料色散调控研究进展[J]. *光电工程*, 2017, **44**(1): 3–22.
- 30 Xu Ting, Zhao Yanhui, Ma Junxian, et al. Sub-diffraction-limited interference photolithography with metamaterials[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(18): 13579–13584.
- 31 Wang Changtao, Gao Ping, Tao Xing, et al. Far field observation and theoretical analyses of light directional imaging in metamaterial with stacked metal-dielectric films[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **103**(3): 031911.
- 32 Liang Gaofeng, Wang Changtao, Zhao Zeyu, et al. Squeezing bulk plasmon polaritons through hyperbolic metamaterials for large area deep subwavelength interference lithography[J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, **3**(9): 1248–1256.
- 33 Liu Ling, Gao Ping, Liu Kaipeng, et al. Nanofocusing of circularly polarized Bessel-type plasmon polaritons with hyperbolic metamaterials[J]. *Materials Horizons*, 2017, doi: 10.1039/C6MH00535G.
- 34 Wang Changtao, Zhao Zeyu, Gao Ping, et al. Surface plasmon lithography beyond the diffraction limit[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, **61**(6): 585–599.
王长涛, 赵泽宇, 高平, 等. 表面等离子体超衍射光学光刻[J]. *科学通报*, 2016, **61**(6): 585–599.
- 35 Moore D T. Gradient-index optics: a review[J]. *Applied Optics*, 1980, **19**(7): 1035–1038.
- 36 Arai J, Okano F, Hoshino H, et al. Gradient-index lens-array method based on real-time integral photography for three-dim-

- ensional images[J]. *Applied Optics*, 1998, **37**(11): 2034–2045.
- 37 Pendry J B, Schurig D, Smith D R. Controlling electromagnetic fields[J]. *Science*, 2006, **312**(5781): 1780–1782.
- 38 Leonhardt U. Optical conformal mapping[J]. *Science*, 2006, **312**(5781): 1777–1780.
- 39 Schurig D, Mock J J, Justice B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. *Science*, 2006, **314**(5801): 977–980.
- 40 Li J, Pendry J B. Hiding under the carpet: a new strategy for cloaking[J]. *Physical Review Letters*, 2008, **101**(20): 203901
- 41 Wang Wei, Xing Hui, Fang Liang, et al. Far-field imaging device: planar hyperlens with magnification using multi-layer metamaterial[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(25): 21142–21148.
- 42 Han S, Xiong Y, Genov D, et al. Ray optics at a deep-subwavelength scale: a transformation optics approach[J]. *Nano Letters*, 2008, **8**(12): 4243–4247.
- 43 Ren Guowei, Wang Changtao, Yi Guangwei, et al. Subwavelength demagnification imaging and lithography using hyperlens with a plasmonic reflector layer[J]. *Plasmonics*, 2013, **8**(2): 1065–1072.
- 44 Liu Ling, Liu Kaipeng, Zhao Zeyu, et al. Sub-diffraction demagnification imaging lithography by hyperlens with plasmonic reflector layer[J]. *RSC Advances*, 2016, **6**(98): 95973–95978.
- 45 Sun J B, Xu T, Litchinitser N M. Experimental demonstration of demagnifying hyperlens[J]. *Nano Letters*, 2016, **16**(12): 7905–7909.
- 46 Kundt N, Smith D R. Extreme-angle broadband metamaterial lens[J]. *Nature Materials*, 2010, **9**(2): 129–132.
- 47 Ma Huifeng, Cui Tiejun. Three-dimensional broadband and broad-angle transformation-optics lens[J]. *Nature Communications*, 2010, **1**(8): 124.
- 48 Narimanov E E, Kildishev A V. Optical black hole: broadband omnidirectional light absorber[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **95**(4): 041106.
- 49 Sheng C, Liu H, Wang Y, et al. Trapping light by mimicking gravitational lensing[J]. *Nature Photonics*, 2013, **7**(11): 902–906.
- 50 Xu Ting, Wang Changtao, Du Chunlei, et al. Plasmonic beam deflector[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(7): 4753–4759.
- 51 罗先刚, 徐挺, 杜春雷, 等. 一种包含纳米缝的金属膜透镜: 中国, ZL200710177752.5[P]. 2008-4-9.
- 52 Wang Dacheng, Zhang Lingchao, Gu Yinghong, et al. Switchable ultrathin quarter-wave plate in terahertz using active phase-change metasurface[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 15020.
- 53 Sun Hongbo. The mystical interlinks: Mechanics, religion or optics?[J]. *Science China-Physics, Mechanics & Astronomy*, 2016, **59**: 614202.
- 54 Luo Jun, Zeng Bo, Wang Changtao, et al. Fabrication of anisotropically arrayed nano-slots metasurfaces using reflective plasmonic lithography[J]. *Nanoscale*, 2015, **7**(44): 18805–18812.
- 55 Pu Mingbo, Chen Po, Wang Changtao, et al. Broadband anomalous reflection based on low-Q gradient meta-surface[J]. *AIP Advances*, 2013, **3**(5): 052136.
- 56 Pfeiffer C, Grbic A. Metamaterial Huygens' surfaces: tailoring wave fronts with reflectionless sheets[J]. *Physical Review Letters*, 2013, **110**(19): 197401.
- 57 Li Xiong, Pu Mingbo, Wang Yanqin, et al. Dynamic control of the extraordinary optical scattering in semicontinuous 2D metamaterials[J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, **4**(5): 659–663.
- 58 Verslegers L, Catrysse P B, Yu Z F, et al. Planar lenses based on nanoscale slit arrays in a metallic film[J]. *Nano Letters*, 2009, **9**(1): 235–238.
- 59 Li Xiong, Pu Mingbo, Zhao Zeyu, et al. Catenary nanostructures as highly efficient and compact Bessel beam generators[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 20524.
- 60 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.
- 61 Tang Dongliang, Wang Changtao, Zhao Zeyu, et al. Ultrabroadband superoscillatory lens composed by plasmonic metasurfaces for subdiffraction light focusing[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, **9**(6): 713–719.
- 62 Goh X M, Lin L, Roberts A. Planar focusing elements using spatially varying near-resonant aperture arrays[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(11): 11683–11688.
- 63 Zhao Zeyu, Pu Mingbo, Gao Hui, et al. Multispectral optical metasurfaces enabled by achromatic phase transition[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 15781.
- 64 Wang Yanqin, Pu Mingbo, Zhang Zuojun, et al. Quasi-continuous metasurface for ultra-broadband and polarization-controlled electromagnetic beam deflection[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 17733.
- 65 Jin Jinjin, Pu Mingbo, Wang Yanqin, et al. Multi-channel vortex beam generation by simultaneous amplitude and phase modulation with two-dimensional metamaterial[J]. *Advanced Materials Technology*, 2017, **2**(2), doi: 10.1002/admt.201600201.
- 66 Hashemi H, Zhang B L, Joannopoulos J D, et al. Delay-bandwidth and delay-loss limitations for cloaking of large objects[J]. *Physical Review Letters*, 2010, **104**(25): 253903.
- 67 Feng Qin, Pu Mingbo, Hu Chenggang, et al. Engineering the dispersion of metamaterial surface for broadband infrared absorption[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(11): 2133–2135.
- 68 Pu Mingbo, Chen Po, Wang Yanqin, et al. Anisotropic meta-mirror for achromatic electromagnetic polarization manipulation[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **102**(13): 131906.
- 69 Guo Yinghui, Wang Yanqin, Pu Mingbo, et al. Dispersion management of anisotropic metamirror for super-octave bandwidth polarization conversion[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 8434.
- 70 Zheng G X, Mühlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, **10**(4): 308–312.
- 71 Decker M, Staude I, Falkner M, et al. High-efficiency dielectric Huygens' surfaces[J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, **3**(6): 813–820.
- 72 Arbabi E, Arbabi A, Kamali S M, et al. High efficiency double-wavelength dielectric metasurface lenses with dichroic birefringent meta-atoms[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(16): 18468–18477.
- 73 Pan Wenbo, Huang Cheng, Chen Po, et al. A beam steering horn antenna using active frequency selective surface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, **61**(12): 6218–6223.
- 74 Huang Cheng, Pan Wenbo, Ma Xiaoliang, et al. Using reconfigurable transmitarray to achieve beam-steering and polarization manipulation applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, **63**(11): 4801–4810.