

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

无反射电磁超构表面研究进展

范辉颖, 罗杰

引用本文:

范辉颖, 罗杰. 无反射电磁超构表面研究进展[J]. *光电工程*, 2023, 50(9): 230147.

Fan H Y, Luo J. Research progress of reflectionless electromagnetic metasurfaces[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(9): 230147.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.230147>

收稿日期: 2023-06-26; 修改日期: 2023-09-01; 录用日期: 2023-09-01

相关论文

基于扭转悬链线结构的高效手性吸波器

蓝翔, 邓钦荣, 张汶婷, 唐紫依, 胡杰, 黄奕嘉, 李玲

光电工程 2022, 49(10): 220157 doi: [10.12086/oe.2022.220157](https://doi.org/10.12086/oe.2022.220157)

Graphene-empowered dynamic metasurfaces and metadevices

Chao Zeng, Hua Lu, Dong Mao, Yueqing Du, He Hua, Wei Zhao, Jianlin Zhao

Opto-Electronic Advances 2022, 5(4): 200098 doi: [10.29026/oea.2022.200098](https://doi.org/10.29026/oea.2022.200098)

电磁超表面对辐射波的调控与应用

朱潜, 田翰闾, 蒋卫祥

光电工程 2023, 50(9): 230115 doi: [10.12086/oe.2023.230115](https://doi.org/10.12086/oe.2023.230115)

全金属超表面在电磁波相位调控中的应用及进展

刘博, 谢鑫, 甘雪涛, 赵建林

光电工程 2023, 50(9): 230119 doi: [10.12086/oe.2023.230119](https://doi.org/10.12086/oe.2023.230119)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



<http://cn.ojournal.org/oe>



OE_Journal



Website

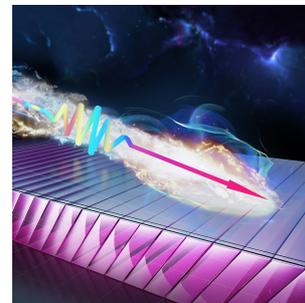


DOI: 10.12086/oe.2023.230147

无反射电磁超构表面研究进展

范辉颖, 罗杰*

苏州大学物理科学与技术学院, 江苏 苏州 215006



摘要: 电磁超构表面是一类由单层或多层亚波长人工微结构组成的平面电磁材料, 可以在亚波长尺度下实现对电磁波的振幅、相位、波前、色散、偏振态以及角动量等多个维度的精准调控, 其中无反射电磁超构表面为实现高效率电磁器件提供了新理论与新方案。本文综述了无反射电磁超构表面的理论与应用, 从惠更斯原理、电磁谐振、布儒斯特效应三个方面阐明了无反射超构表面的基本原理, 介绍了相关的重要应用, 包括异常折射、偏振操控、超构减反膜、电磁波完美吸收等, 并对该领域面临的挑战和发展前景进行了总结与展望。

关键词: 超构表面; 无反射特性; 电磁谐振; 惠更斯超构表面; 布儒斯特超构表面

中图分类号: O441

文献标志码: A

范辉颖, 罗杰. 无反射电磁超构表面研究进展 [J]. 光电工程, 2023, 50(9): 230147

Fan H Y, Luo J. Research progress of reflectionless electromagnetic metasurfaces[J]. *Opto-Electron Eng.* 2023, 50(9): 230147

Research progress of reflectionless electromagnetic metasurfaces

Fan Huiying, Luo Jie*

School of Physical Science and Technology, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

Abstract: Electromagnetic metasurfaces, as a class of planar electromagnetic materials consisting of single-layer or multilayer subwavelength artificial micro-structures, can precisely control the amplitude, phase, wavefront, dispersion, polarization, and angular momentum of electromagnetic waves in the subwavelength scale. In particular, reflectionless electromagnetic metasurfaces provide new theories and schemes for realizing high-efficiency electromagnetic devices. In this review, we elaborate the underlying mechanism of reflectionless metasurfaces from the perspective of the Huygens principle, electromagnetic resonances and the Brewster effect. We also discuss the important applications including anomalous refraction, polarization manipulation, meta-antireflection coatings, and perfect electromagnetic absorption, and point out the challenges and potentials of this field.

Keywords: metasurfaces; reflectionless property; electromagnetic resonances; Huygens' metasurfaces; Brewster metasurfaces

收稿日期: 2023-06-26; 修回日期: 2023-09-01; 录用日期: 2023-09-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12374293); 江苏省自然科学基金项目 (BK20221354)

*通信作者: 罗杰, luojie@suda.edu.cn。

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

1 引言

电磁超构材料 (Metamaterials)^[1-3] 是一种由具有特定电磁响应的亚波长微结构单元组成, 且具有天然物质所不存在的电磁特性的人工微结构材料。通过合理选择微结构单元的材料和几何结构, 超构材料可以突破天然物质的限制, 拥有近乎任意的电磁参数, 例如介电常数、磁导率等, 展现出了丰富的非常规物理效应, 例如负折射^[4]、完美透镜效应^[5-7]、电磁隐身^[8-11]等, 为实现多维度、多功能的电磁调控器件奠定了重要的理论与材料基础。

微型化与集成化是电磁器件的未来发展趋势。超构表面 (Metasurfaces)^[12-46], 作为超构材料的二维平面形式, 因拥有厚度薄、损耗低、易于加工制备和集成等优点, 以及巨大的应用潜力, 受到全世界研究人员的广泛关注。超构表面通常由单层或多层亚波长人工微结构单元按照特定功能需要排列构成, 能够在亚波长尺度上实现对电磁波的振幅、相位、波前、色散、偏振态以及角动量等多个维度的精准调控。近年来, 研究人员相继提出了梯度超构表面^[12,13,47-48]、编码超构表面^[26,49-50]、非线性超构表面^[30-32]、惠更斯超构表面^[44-46,51-52]、布儒斯特超构表面^[53-56]等不同类型的电磁超构表面, 它们在波前操控^[12-13,47]、高效表面波耦合器^[48,57-59]、超构透镜^[60-71]、偏振调控^[52,72-76]、电磁波吸收^[77-84]、隐形斗篷^[85-89]等应用方面显示了巨大的潜力和优势。

效率是诸如超构透镜、偏振调控等应用中的一个极为关键的性能指标, 因此, 如何提升电磁调控效率是超构表面领域中的一个关键科学问题。对于具有广泛应用前景的透射式超构表面, 其效率主要受限于损耗和反射这两个因素^[29,90-91]。鉴于此, 提高效率的方法就是降低损耗和消除反射, 前者可以通过采用损耗极低的电介质材料来实现^[27-28,92], 而后者通常需要在微结构单元中构建精准的电谐振和磁谐振来消除反射。于是, 研究人员相继提出了惠更斯超构表面^[44-46,51-52]、多层结构超构表面^[18,29,87]、布儒斯特超构表面^[53-56]等新型超构表面, 从谐振型物理机制发展到了非谐振物理机制, 从单一频率扩展到了宽频段, 从小入射角拓展到了大入射角, 甚至全角度, 这些为实现高效率电磁器件提供了新理论与新方案。在这里, 我们将结合了反射波抑制机制, 并能够实现透射波振幅、相位、偏振、传播方向等高效调控的一类超构表面统称为无

反射超构表面。目前, 无反射超构表面的机理与设计研究仍是该领域的重要研究方向之一。

本文全面地综述了无反射电磁超构表面的理论与应用。首先介绍了消除超构表面上反射的基本原理, 包括惠更斯原理、电磁谐振、布儒斯特效应等。然后, 介绍了无反射电磁超构表面的一些重要应用, 包括折射操控、偏振操控、超构减反膜、电磁波完美吸收等。最后, 对该领域面临的挑战和发展前景进行了总结与展望。

2 无反射超构表面的物理机理与设计方法

超构表面的厚度通常远小于电磁波波长, 因此, 可以将超构表面看作是没有厚度的“过渡界面”, 在该界面上, 入射波与折射波的电磁场往往是不连续的, 从而产生了反射波。由此可见, 消除反射的一个重要手段是在超构表面中引入等效的电流密度和磁流密度来满足入射波与折射波的电磁场边界条件。另一方面, 超构表面也可以看作是一个厚度很薄的均匀等效介质, 由等效介电常数、等效磁导率等参数来描述。在这种情况下, 超构表面上的反射可以看作是其等效介质与空气的阻抗不匹配导致的, 因而, 消除反射的另一个重要手段就是在超构表面的微结构单元中构建平衡的电谐振和磁谐振响应, 从而获得与空气匹配的等效阻抗。本节主要从这两个角度出发, 介绍无反射电磁超构表面的物理机理与设计方法, 并讨论拓展入射角范围与工作带宽的机制与方法。

2.1 惠更斯超构表面

在超构表面的界面上, 若将入射电磁波转换为期望的出射电磁波, 往往会导致场的不连续, 从而出现反射。在这里, 可以将超构表面看作是电磁场不连续的“过渡界面”^[93], 并引入正交的表面电流密度 \mathbf{J}_s 和表面磁流密度 \mathbf{M}_s , 进而保证电场和磁场的连续性, 如图 1(a) 所示。在被动式 (passive) 超构表面中, 这样的表面电流和表面磁流可以由入射波通过激发超构表面中微结构单元的电响应和磁响应产生。由此, 区域 1 中的入射场 $(\mathbf{E}_1, \mathbf{H}_1)$ 和区域 2 中的任意场 $(\mathbf{E}_2, \mathbf{H}_2)$ 可以通过如下边界条件关联:

$$\hat{\mathbf{n}} \times (\mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1) = -\mathbf{M}_s, \quad (1)$$

$$\hat{\mathbf{n}} \times (\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1) = \mathbf{J}_s, \quad (2)$$

其中, $\hat{\mathbf{n}}$ 为“过渡界面”的法向量。根据式 (1) 和 (2)

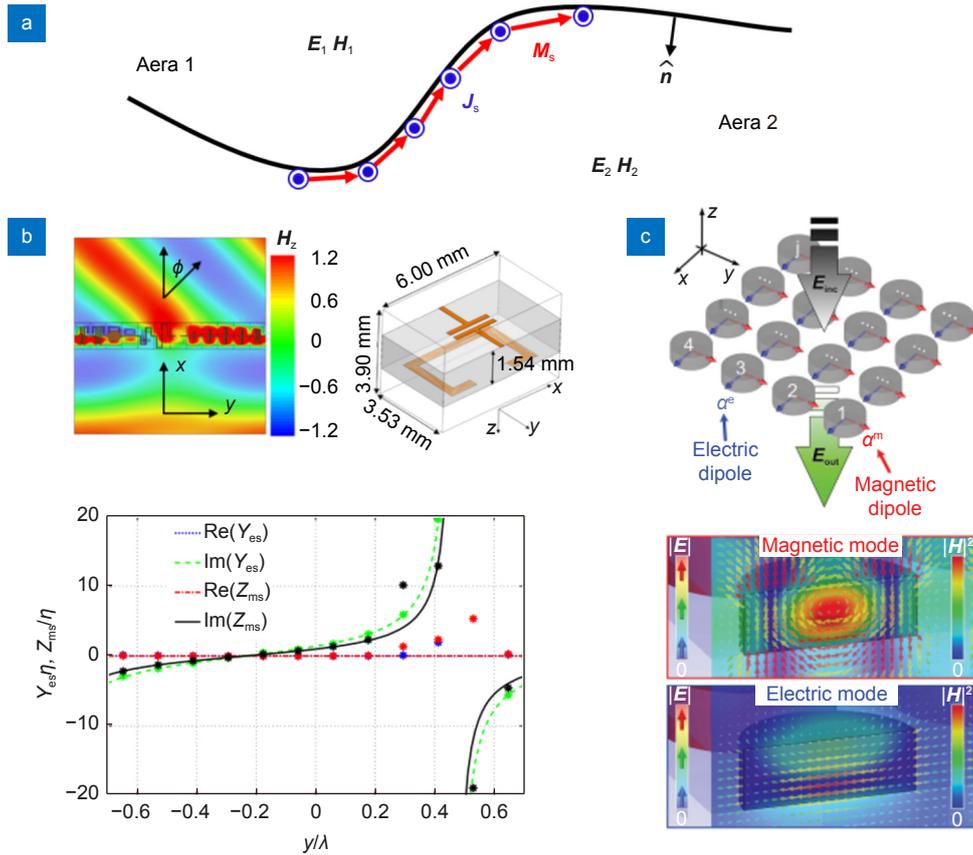


图 1 惠更斯超构表面。(a) 惠更斯超构表面的物理机制示意图^[93]；(b) 金属结构的惠更斯超构表面^[51]；(c) 全电介质惠更斯超构表面^[92]

Fig. 1 Huygens' metasurfaces. (a) Illustration of the physical mechanism of the Huygens' metasurfaces^[93]；(b) Metallic Huygens' metasurfaces^[51]；(c) All-dielectric Huygens' metasurfaces^[92]

可知，通过激发合适的表面电流密度 J_s 和磁流密度 M_s ，可以有效改变透射场 (E_2, H_2) 。另一方面，根据惠更斯-菲涅耳定律，电磁波以球形波面传播，波前面上的每一点作为次波源，将以一定强度和相位的球面波形式继续传播，次波的相干叠加形成新的波前面。在这里，可以将“过渡界面”看作是入射波的一个波前面，通过改变该波前面上每一点处的 J_s 和 M_s ，可以有效操控次波源，进而实现对透射波波前的任意操控。这样的超构表面被称为惠更斯超构表面^[44-46,51-52,67,72-73,90,92-130]。

惠更斯超构表面由 Pfeiffer 等人^[51]于 2013 年首次提出。根据表面电导纳 Y_{es} 与表面电流密度 J_s 的关系(即 $J_s = Y_{es} \cdot \frac{1}{2}[\hat{n} \times (E_1 + E_2)]$)，以及表面磁阻抗 Z_{ms} 与表面磁流密度 M_s 的关系(即 $M_s = Z_{ms} \cdot \frac{1}{2}[\hat{n} \times (H_1 + H_2)]$)，并结合式(1)和(2)，该工作推导了要实现电磁波无反射操控，超构表面的表面电导纳 Y_{es} 和磁阻抗 Z_{ms} 所需满足的条件，即

$$Y_{es}\eta = Z_{ms}/\eta = 2 \frac{1-T}{1+T}, \quad (3)$$

其中： T 为超构表面上的透射系数， η 为自由空间中的波阻抗。一般情况下 Y_{es} 和 Z_{ms} 为张量，而对于特定线偏振电磁波在垂直入射的情况下，可以简化为式(3)中的标量形式^[51]。

对于无反射、全透射的惠更斯超构表面，其透射系数 T 可写为 $T = e^{i\varphi}$ ，代入式(3)可得 $Y_{es}\eta = Z_{ms}/\eta = -i2 \tan(\varphi/2)$ 。结果表明，归一化的表面电导纳和磁阻抗相等且为纯虚数。此外，表面阻抗与透射相位 φ 有关，每个特定的透射相位对应于相应的表面导纳或阻抗。另一方面，超构表面的表面电导纳 Y_{es} 与磁阻抗 Z_{ms} 分别正比于电极化率 α_e^{eff} 与磁极化率 α_m^{eff} (即 $Y_{es} = -i\omega\alpha_e^{eff}$ ， $Z_{ms} = -i\omega\alpha_m^{eff}$)，它们分别对应于微结构单元中的电偶极矩与磁偶极矩。由此，可得到无反射条件为

$$\alpha_e^{eff}\eta = \alpha_m^{eff}/\eta = \frac{2}{\omega} \tan(\varphi/2), \quad (4)$$

即超构表面的微结构单元需满足平衡的电谐振与磁谐振响应。

为此, Pfeiffer 等人设计了由一层电谐振的对称锚状结构与一层磁谐振的开口谐振环结构组成的微结构单元^[51], 如图 1(b) 所示。上下两层结构分别用于调控电谐振与磁谐振响应, 产生电极化率 α_e^{eff} 与磁极化率 α_m^{eff} , 通过改变结构单元的尺寸和上下层之间的间隔距离, 可使其满足平衡条件, 即式 (4)。此时, 等效电导纳和磁阻抗分别为 $Y_{\text{es}}\eta = 0.02 + 3.14i$ 和 $Z_{\text{ms}}/\eta = 0.07 + 2.3i$, 近似满足式 (3)。这一惠更斯超构表面可以将底部垂直入射的平面波偏折 45° , 而不引起反射。同年, Pfeiffer 等人^[52]还提出了一种三层对称结构单元构建的惠更斯超构表面, 每一层微结构用以调控电谐振, 而利用顶层与底层结构单元之间的容性耦合可以调控磁谐振。这两项开创性工作很快激起了一系列后续研究, 多层堆叠结构^[73,94,101]、螺旋型^[99]、 Ω 型^[100,119,131]等不同类型的惠更斯超构表面被相继提出。

然而, 在可见光和近红外等高频段, 金属结构面临着巨大的欧姆损耗, 这大大降低了电磁波在惠更斯超构表面中的透射效率^[95,129]。为了解决这一问题, 2015 年 Decker 等人提出了一种全电介质惠更斯超构表面^[92], 由高折射率的电介质纳米盘阵列构成, 如图 1(c) 所示。每个电介质纳米盘都可看作是一个理想的惠更斯源, 这样的电介质纳米盘可以同时激发电偶极和磁偶极模式, 通过改变纳米盘的半径与高度, 可以有效调控其电偶极模式对应的等效电极化率 α_e^{eff} , 以及磁偶极模式对应的等效磁极化率 α_m^{eff} 。当它们满足平衡条件, 即式 (4) 时, 超构表面上的反射将被消除, 同时, 透射光波的相位操控可以覆盖整个 2π 相位。原则上, 电介质惠更斯超构表面光波操控的透射效率可以达到 100%。

Decker 等人进一步通过实验证实了 0 到 2π 的透射相位覆盖, 在近红外的传输效率超过 55%^[92]。

值得一提的是, 电介质惠更斯超构表面的无反射现象也可以看作是一类广义 Kerker 效应^[105,108,132], 当硅纳米盘中的电偶极子共振强度和磁偶极子共振强度相等时, 满足第一 Kerker 条件, 其等效相对介电常数与磁导率相等, 此时背向散射为零, 即超构表面上的反射为零。

上述无反射机理适用于任意偏振与入射角的电磁波。2015 年, Paniagua 等人研究了由高折射率电介质

纳米颗粒阵列构成的超构表面在不同偏振、入射角的光波下的反射特性^[104], 研究发现, 对于任一偏振, 都可以在特定入射角下获得无反射效果, 且入射角的变化范围涵盖了 $0\sim 90^\circ$ 。类似于上述的电介质惠更斯超构表面, 这一无反射特性也是由电介质纳米颗粒中激发的电偶极子和磁偶极子的相互作用引起的, 对特定偏振光在特定角度上产生了辐射抑制效应。Paniagua 等人将这一无反射现象称为广义布儒斯特效应^[104,107]。2018 年 Kwon 等人进一步研究了这一零反射现象的物理机制^[111], 指出正交切向电偶极子和磁偶极子产生的对称散射与非对称散射的相消干涉导致了零反射, 并进一步证实了透射相位确实覆盖整个 2π 范围。

惠更斯超构表面为电磁波的无反射操控提供了新思路, 鉴于其可以极大提高超构表面的透射效率, 相关研究迎来了飞速发展, 从被动型到可调谐的主动型^[67,98,102,122,133], 从各向同性到双各向异性^[100,110], 从偶极谐振到高级谐振^[118], 在波前调控^[51,116]、偏振调控^[73,76,114]、超构透镜与全息成像^[67,113,117,121]等方面展现出了重要的应用前景。

2.2 多层结构的无反射超构表面

上述惠更斯超构表面主要通过通过对电谐振与磁谐振的调控并使其满足平衡条件来消除反射。2016 年, Sun 等人提出了一类无需借助磁谐振结构的无反射超构表面^[59], 由类似三明治的 ABA 型结构单元构成 (图 2(a)), 其中 A 和 B 代表两种非磁性超构材料 (相对磁导率为 1), 它们厚度分别为 d_A 和 d_B , 相对介电常数分别为 ϵ_A 和 ϵ_B 。通过传输矩阵^[132,134], 可推导出零反射条件:

$$Z_A^2 \left[2 - \tan(k_A d_A) \tan(k_B d_B) \frac{Z_A}{Z_B} + \frac{\tan(k_B d_B) Z_B}{\tan(k_A d_A) Z_A} \right] = 2 - \tan(k_A d_A) \tan(k_B d_B) \frac{Z_B}{Z_A} + \frac{\tan(k_B d_B) Z_A}{\tan(k_A d_A) Z_B}, \quad (5)$$

其中: $k_i = k_0 \sqrt{\epsilon_i}$, $Z_i = 1/\sqrt{\epsilon_i}$ ($i = A, B$), k_0 为电磁波在真空中的波数。根据式 (5), 图 2(a) 中间图中的黑色实线给出了关于 ϵ_A 和 ϵ_B 的零反射曲线, 五条虚线分别对应于相位为 22° 、 94° 、 166° 、 238° 和 310° 的等相位曲线。结果表明, 在零反射条件下, 通过改变 ϵ_A 和 ϵ_B 可以实现透射相位在 $0\sim 2\pi$ 内全覆盖。

根据零反射曲线与等相位曲线的交点, Sun 等人设计了五种不同的微结构单元, 可以在获得低反射的同时实现对透射相位的调控, 其结构如图 2(a) 右图所

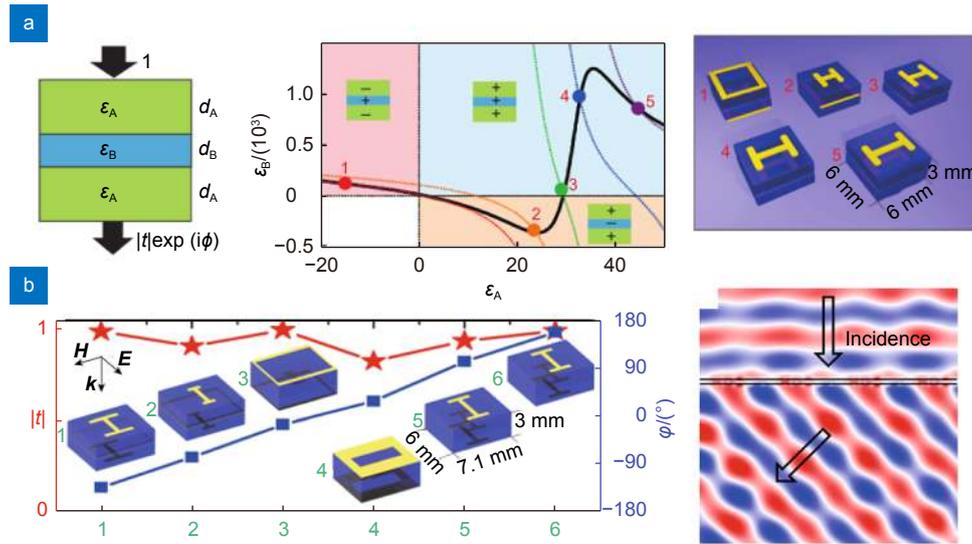


图 2 多层结构的无反射超构表面。(a) ABA 型的超构表面结构单元及机理^[59];
(b) ABA 型的无反射超构表面及对折射波的操控^[87]

Fig. 2 Multi-layered reflectionless metasurfaces. (a) ABA-type metasurface units and the underlying mechanism^[59];
(b) ABA-type reflectionless metasurfaces for refracted wave manipulation^[87]

示, 其中 H 形金属结构和金属网格结构分别用于获得正值和负值的等效介电常数。通过将这五种微结构单元进行组合, 他们设计了一种无反射的梯度超构表面, 并用以实现高效表面等离子耦合器。实验结果表明, 在 9.2 GHz 的频率下, 可以将自由空间中的入射波高效地转化为人工表面等离子元, 其效率(模型效率为 94%, 实验效率近 80%)超过当时所有的表面波耦合器件^[59]。

基于这一多层结构的无反射超构表面, 2018 年 Chu 等人设计了一种用于偏折入射波的无反射梯度超构表面^[87], 其由 6 个拥有不同透射相位的微结构单元组成, 如图 2(b) 所示, 在 10.2 GHz 的频率下, 可以将正入射的电磁波弯曲到 45°, 实验测得透射率为 87%。并且, 他们进一步将这一无反射梯度超构表面与零折射率材料^[135-142]相结合, 设计出了一款超薄隐形斗篷。

值得一提的是, 这类多层结构的无反射超构表面也可以通过电磁谐振的机制来理解, 每一层中的微结构提供了电谐振响应, 而层间耦合引起了有效的磁谐振响应^[29,52]。

2.3 布儒斯特超构表面

惠斯超构表面与多层结构的无反射超构表面都采用的是谐振型微结构单元。然而, 谐振的本性使得微结构单元的电磁响应通常对其关键物理量(如材料、几何构型、几何参数)的变化极其敏感, 同时, 谐振

的本性也决定了有限的工作带宽。这一物理机制使得无反射超构表面的工作带宽往往较窄。

为了解决谐振导致的有限带宽这一问题, 2021 年 Luo 等人^[53]提出了一种基于非谐振物理机制的无反射超构表面, 即布儒斯特超构表面, 其物理机制为非谐振的反常布儒斯特效应。布儒斯特效应是光学中一个重要的基本概念, 当自然光以布儒斯特角入射到介质界面, 且反射光线与折射光线互相垂直时, 横磁(transverse magnetic, TM)偏振光不发生反射, 完全透射进入介质^[53,76,104,143-146]。而这里的反常布儒斯特效应结合了经典布儒斯特效应、光学互易原理以及各向异性介质中的丰富的参数自由度, 超越了经典布儒斯特效应, 能够在超宽频谱中实现无反射的电磁波吸收和折射操控。为探究其原理, 他们首先研究了 TM 偏振电磁波在各向异性介质基底上的反射系数(图 3(a)左图):

$$r = \frac{(\epsilon_{xx}\epsilon_{yy} - \epsilon_{xy}\epsilon_{yx})k_{b,y} - \epsilon_b(\epsilon_{xy}k_x + \epsilon_{yy}k_y)}{(\epsilon_{xx}\epsilon_{yy} - \epsilon_{xy}\epsilon_{yx})k_{b,y} + \epsilon_b(\epsilon_{xy}k_x + \epsilon_{yy}k_y)}, \quad (6)$$

其中, ϵ_b 为入射介质的相对介电常数, ϵ_{xy} 和 ϵ_{yy} 为各向异性介质基底的相对介电张量 ϵ 在 x - y 坐标中的分量, 其中 $\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon_x \cos^2 \alpha + \epsilon_y \sin^2 \alpha & (\epsilon_x - \epsilon_y) \sin \alpha \cos \alpha \\ (\epsilon_x - \epsilon_y) \sin \alpha \cos \alpha & \epsilon_x \sin^2 \alpha + \epsilon_y \cos^2 \alpha \end{pmatrix}$, ϵ_x 和 ϵ_y 为旋转的 x' - y' 坐标下的相对介电常数分量, 坐标的旋转角为 α 。 k_x 和 $k_{b,y}$ 分别为入射介质中的波矢在 x 和

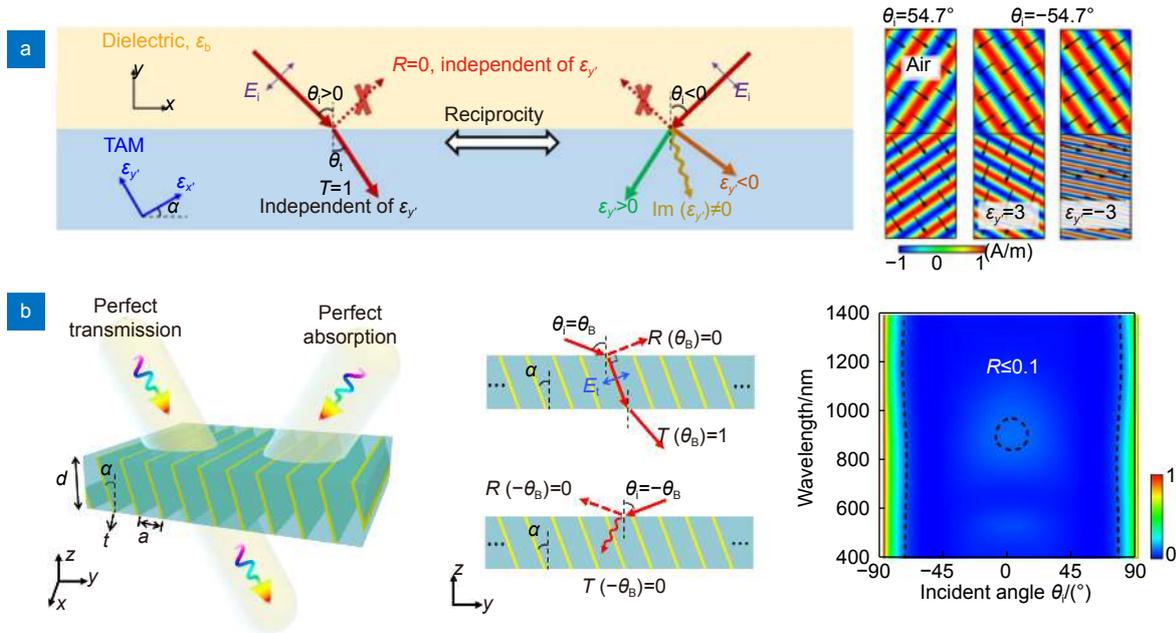


图 3 布儒斯特超构表面。(a) 布儒斯特超构表面的机理及其对折射波的无反射操控^[53];
(b) 光学布儒斯特超构表面的设计及宽频无反射特性^[54]

Fig. 3 Brewster metasurfaces. (a) The underlying physics of Brewster metasurfaces and their applications for reflectionless manipulation of refracted waves^[53]; (b) The design and broadband reflection property of optical Brewster metasurfaces^[54]

y 方向上的分量, 它们通过色散关系 $k_x^2 + k_{b,y}^2 = \epsilon_b k_0^2$ 关联。 k_y 为各向异性介质基底中的波矢在 y 方向上的分量, 与 k_x 通过色散关系 $k_x^2 \epsilon_{xx} + k_y^2 \epsilon_{yy} + k_x k_y (\epsilon_{xy} + \epsilon_{yx}) = (\epsilon_{xx} \epsilon_{yy} - \epsilon_{xy} \epsilon_{yx}) k_0^2$ 关联。对于入射角 θ_i , 有 $k_x = \sqrt{\epsilon_b} k_0 \sin \theta_i$ 。通过求解零反射 (即 $r = 0$) 条件, 可得如下特解:

$$\theta_i = \pm(\pi/2 - \alpha) = \pm \arctan\left(\sqrt{\epsilon_x} / \sqrt{\epsilon_b}\right). \quad (7)$$

式 (7) 表明, 该零反射条件与 ϵ_y 无关, 这意味着 ϵ_y 可以作为独立调控透射的自由度, 而不会影响零反射特性。

这一零反射特性的物理机制也可以通过如下物理图像来理解。图 3(a) 以 TM 波为例, 当电磁波以 $\theta_i = \arctan\left(\sqrt{\epsilon_x} / \sqrt{\epsilon_b}\right)$ 从左上方入射到光轴倾斜角为 $\alpha = \pi/2 - \arctan\left(\sqrt{\epsilon_x} / \sqrt{\epsilon_b}\right)$ 的各向异性介质基底时, 介质基底中折射波的电场恰好平行于 ϵ_x , 此时, 折射波只会“看到”介电常数分量 ϵ_x , 而这一入射角恰好为布儒斯特角^[143,145], 因而不会有反射, 且与 ϵ_y 无关。有趣的是, 由于在互易介质表面上关于界面法线对称的入射光的反射系数始终相同, 将上述入射波翻转到右上方, 也将出现零反射, 且不受 ϵ_y 影响。然而, 此时介质基底中的 ϵ_y 会与折射波发生相互作用, 进而可以有效调控透射波的振幅和相位, 重要的是, 这一过

程始终无反射。如图 3(a) 右图中的模拟结果可以看出, 通过改变 ϵ_y , 可以有效操控折射波的方向, 并且不会引起反射。这一无反射现象被称为反常布儒斯特效应^[53]。

值得指出的是, 反常布儒斯特效应是一种非谐振的物理效应, 因而可以实现超宽频无反射电磁波操控。基于这一新物理效应, 2021 年, Luo 等人设计了一种新型光/电磁波吸收体, 即布儒斯特吸收体, 在反常布儒斯特角下, 理论上可以从准静场到光频的超宽频段内实现无反射的吸收^[53]。同年, Fan 等人基于反常布儒斯特效应, 设计了光频段的布儒斯特超构表面 (图 3(b))^[54], 由嵌入在电介质基底中的倾斜金属薄膜阵列组成, 数值模拟结果表明, 在 400~1400 nm 的波长范围内, 对于 $|\theta_i| \leq 75^\circ$ 角度内的入射光波, 反射率始终都很低 (图 3(b) 右图)。此外, Ma 等人将布儒斯特超构表面与相变材料相结合^[55], 提出了宽频可调谐的角度非对称光传输器件的设计方案。2022 年, Fan 等人进一步设计了对掠射 (入射角接近 90°) 电磁波宽频无反射的布儒斯特超构表面^[56], 其零反射角原则上可以任意大。由于所设计的布儒斯特超构表面是由简单的非谐振结构单元构成, 不需要特别的磁响应, 因此拥有超大的工作带宽, 原则上可以从准静场一直到光频段。

2.4 广角无反射超构表面

大多数的无反射超构表面都是针对特定角度的入射波设计的, 尤其是垂直入射电磁波。而广角无反射的电磁波调控在诸如广角成像^[70]、裸眼 3D 显示^[147]、激光雷达^[148]等实际应用中是亟需突破的关键技术。然而, 要实现广角无反射并不容易, 这是因为常用的谐振型微结构单元的电磁响应通常对其关键物理量的变化非常敏感, 而且谐振型微结构单元通常拥有强非局域效应或空间色散^[149-151], 即其电磁响应依赖于电磁波入射角。

为了拓宽无反射超构表面的角度范围, 研究人员提出了多种方案。例如, 2019 年, Wang 等人利用巧妙设计的电磁谐振微结构单元^[146], 构造了一款对横电 (transverse electric, TE) 波广角无反射的太赫兹超构表面, 其微结构单元如图 4(a) 所示, 由置于电介质基底上的一个金属方形环和一个金属圆盘组成。周期性排列的金属方形环将形成两个正交的金属棒, 产生可调节的电响应。与此同时, 金属圆盘通过感应表面电流产生与施加磁场相反的各向异性磁矩, 从而产生了可调谐的磁响应。通过改变金属方形环与金属圆盘的结构尺寸, 可以有效调控超构表面的空间色散, 从而对 TE 波实现与空气在近乎所有角度上的阻抗匹配 (图 4(a))。数值模拟结果表明, 在 0°~84° 的角度范围内, TE 波在该超构表面上的反射率均小于 0.1%。

2022 年, Lv 等人通过各向异性的电磁谐振微结构单元, 获得了满足近乎全角度阻抗匹配要求的各向异性电磁参数, 实现了近全角度无反射的微波超构表面^[152], 其等效相对介电常数和磁导率张量表示为

$$\hat{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_t(f) & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_t(f) & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_n(f) \end{bmatrix}, \hat{\mu} = \begin{bmatrix} \mu_t(f) & 0 & 0 \\ 0 & \mu_t(f) & 0 \\ 0 & 0 & \mu_n(f) \end{bmatrix} \quad (8)$$

全角度零反射条件要求电磁参数满足:

$$\epsilon_t(f) = \mu_t(f) = 1/\mu_n(f) \quad (9)$$

式 (9) 可以看作是实现全角度布儒斯特效应的条件^[149,153]。另一方面, 从变换光学的角度, 式 (9) 也可以看作是对一薄层空气坐标拉伸或压缩而得到的变换光学材料所满足的参数条件^[8,154-155]。Lv 等人设计的超构表面结构单元^[152]如图 4(b) 左图所示, 由电谐振结构与磁谐振结构组成, 电谐振结构位于中间层, 磁谐振结构放置在基板的顶层和底层, 并通过金属通孔连接。数值结果表明, 在 9~10 GHz 的频段内, 其等效电磁参数近似满足式 (9)。实验测量结果 (图 4(b) 右图) 表明, 对于 TE 波, 该超构表面拥有宽频 (9~10.2 GHz)、广角 (0°~80°) 的无反射特性。

值得一提的是, 研究人员还针对掠射区域 (入射角接近 90°) 设计了特别的无反射超构表面。事实上, 要在掠射下实现电磁波的无反射是非常具有挑战性的,

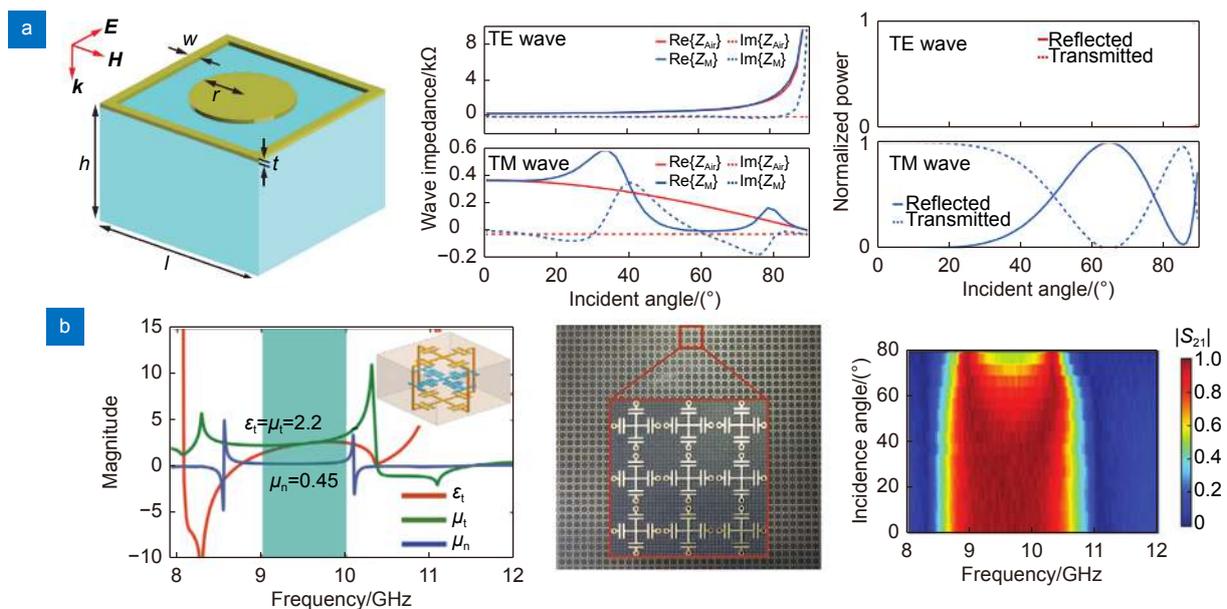


图 4 广角无反射超构表面。(a) 对 TE 波广角无反射的太赫兹超构表面^[146]; (b) 对 TE 波广角无反射的微波超构表面^[152]

Fig. 4 Wide-angle reflectionless metasurfaces. (a) Wide-angle reflectionless terahertz metasurfaces^[146]; (b) Wide-angle reflectionless microwave metasurfaces for TE waves^[152]

这是因为空气的波阻抗在掠射区域会急剧增大或降低, 且对入射角极其敏感。为了获得掠射下的无反射特性, 2022年, Chu 等人利用各向异性的电磁谐振结构, 针对大入射角 (75°~85°) 设计了对 TE 波和 TM 波均无反射的微波超构表面^[156]。同年, Fan 等人基于反常布儒斯特效应与广义布儒斯特效应, 设计了对掠射 TM 波超宽频无反射的布儒斯特超构表面, 其零反射角原则上可以任意接近90°^[56]。

2.5 宽频无反射超构表面

通常情况下, 谐振机制的本性会导致无反射超构表面被限制在很窄的频谱内。布儒斯特超构表面利用

非谐振的物理机制, 突破了谐振型超构表面的带宽限制, 拥有超大的工作带宽^[53-56]。然而, 布儒斯特超构表面只适用于斜入射, 不能对垂直入射的电磁波实现超宽频无反射操控。

为了拓展谐振型超构表面的无反射带宽, 2015年, Asadchy 等人利用螺旋型微结构单元设计了一款宽频无反射的微波超构表面, 由于入射电磁波与微结构单元的相互作用非常微弱, 因而在非谐振频率下通常不会引起大的反射 (图 5(a) 左图)^[99]。数值结果表明, 在 10 GHz 频率以下, 该超构表面的反射率均非常低 (图 5(a) 右图)。同年, Dong 等人运用优化算法设计了一款宽频低反射的太赫兹超构表面 (图 5(b)

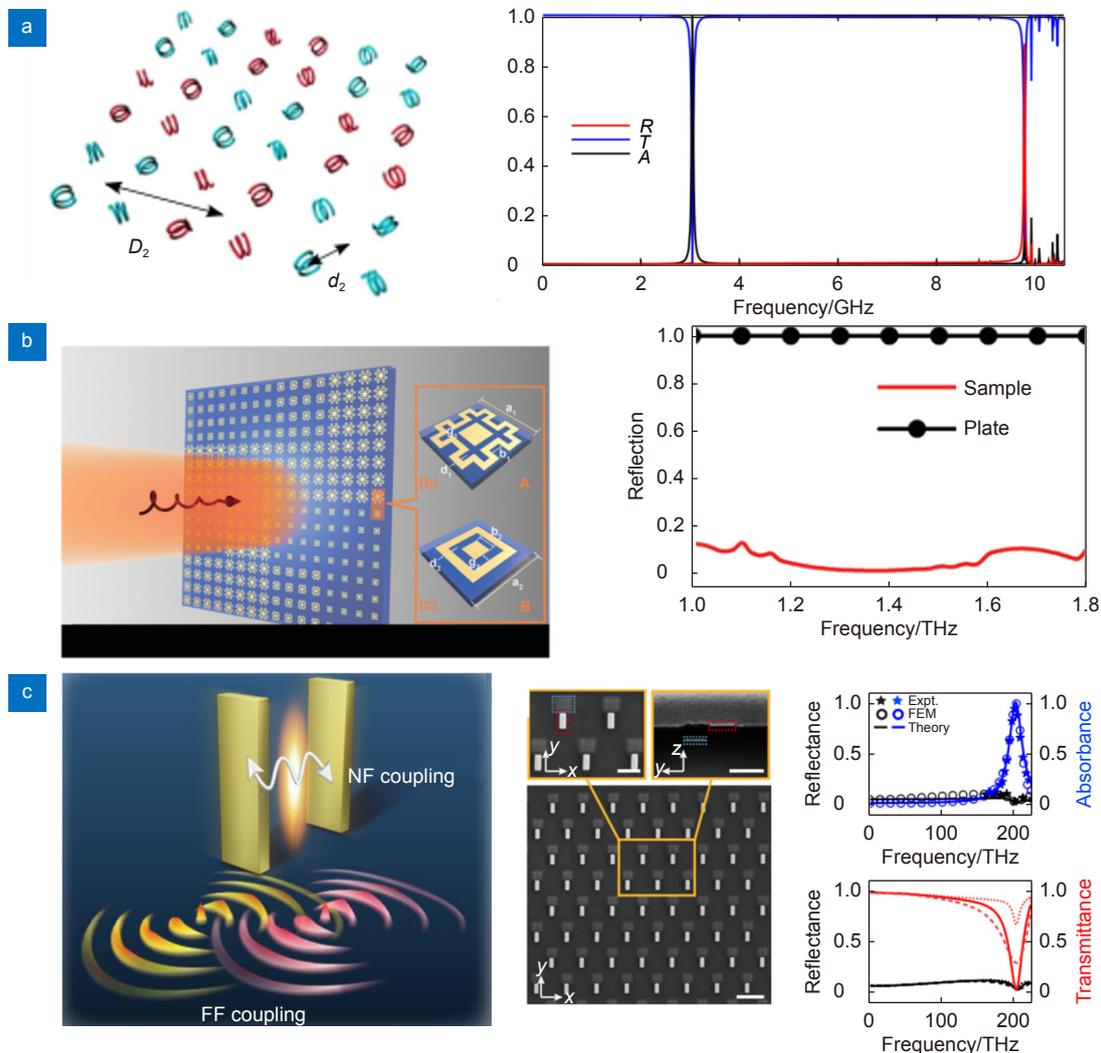


图 5 宽频无反射超构表面。(a) 基于螺旋型微结构单元的宽频无反射微波超构表面^[99]; (b) 利用优化算法设计的宽带低反射的太赫兹超构表面^[157]; (c) 由双层微结构单元组成的超宽频无反射超构表面^[158]

Fig. 5 Broadband reflectionless metasurfaces. (a) Broadband reflectionless microwave metasurfaces consisting of double-turn helix units^[99]; (b) Broadband low-reflection terahertz metasurfaces based on optimization methods^[157]; (c) Ultra-broadband reflectionless microwave metasurfaces consisting of double-layer units^[158]

左图)^[157]。为了实现在工作频段内的透射相位连续调控, 他们设计了两种不同的微结构单元。实验结果表明, 在 1~1.8 THz 频段内, 垂直入射电磁波在该超构表面上的反射均非常小 (图 5(b) 右图)。

尽管通过结构优化可以在一定程度上扩展无反射带宽, 但无反射带宽总是很有限。2023 年, Zheng 等人提出了实现宽频无反射的新机制^[158]。他们设计的超构表面由双层微结构单元组成 (图 5(c) 左图), 利用上下两层中微结构单元的 near field (NF) 耦合与远场 (far field, FF) 耦合诱导的 Kerker 效应, 实现了宽频无反射的超构表面。模拟结果表明, 该超构表面的反射率在 0~225 THz 这一超宽频段内都几乎为零。实验表明, 反射率在除谐振频率外的整个实验频率范围 (160~220 THz) 都非常小。此项工作为超宽频无反射超构表面提供了新思路。

综上所述, 反射在很大程度上影响了超构表面的使用效率, 无反射超构表面充分利用了微结构单元的电响应和磁响应, 获得了与空气匹配的等效阻抗, 消除了反射。这种无反射特性使得人们能够进一步提升表面波耦合、光场调控、超构透镜、电磁隐身等器件的效率, 为实现高效率电磁器件提供了新理论与新方案, 在前沿研究和应用中有重要意义。

值得一提的是, 除了上述方法, 还有一些其它方法可以实现电磁波的无反射, 例如异常光学透射 (extraordinary optical transmission, EOT)^[159-174] 和电磁诱导透明 (electromagnetically induced transparency, EIT)^[175-192]。前者为电磁波通过带有亚波长孔径的金属板时, 周期性的孔阵列在入射光照射下出现了宏观 Bloch 模式, 这种表面模式是一种束缚在金属表面的电磁波波导模式, 可以增强金属表面的电磁场, 从而获得相对于经典小孔透射理论高得多的透射率^[159-162]。而电磁诱导透明被发现于三能级原子系统中, 是一种典型的量子相干效应, 通过适当地调节诱导光束, 探测光束可以直接透过介质, 不再被介质吸收, 使得原本不透明的介质产生一个窄带的透明窗口^[176-178]。

3 无反射超构表面的应用

无反射超构表面极大地提高了超构表面对电磁波的操控效率, 为实现高效率电磁器件提供了新理论与新方案。本节将讨论基于无反射超构表面的重要应用, 包括异常折射^[51,61,95,112,193]、偏振操控^[72-74]、超构减反膜^[123,194,195] 和完美吸收^[53-56,77,128,196-204]。

3.1 异常折射

根据经典电磁理论, 电磁波入射到两种介质界面处会发生折射, 其方向满足经典斯涅耳定律, 即

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t, \quad (10)$$

其中: θ_i 和 θ_t 分别是入射角和折射角, n_i 和 n_t 为入射和折射介质的折射率。式 (10) 是建立在电磁波在入射和折射介质界面上切向波矢分量连续这一基础上的。有趣的是, 近些年研究人员发现在非均匀的梯度界面上, 入射和折射电磁波的切向波矢分量不再满足连续条件, 需要将因界面的非均匀性而额外引起的波矢切向分量考虑在内。此时, 将出现异常折射现象, 不再满足经典斯涅耳定律^[12-15]。

超构表面可以实现对透射波相位的操控, 覆盖整个 $0 \sim 2\pi$ 范围。鉴于此, 研究人员利用了梯度超构表面中微结构单元的“排列序构”自由度, 将具有不同透射相位的微结构单元作为次波源, 干涉形成任意的电磁波波前形貌, 从而控制折射波的传播方向。这样的梯度超构表面可以看作是等效的非均匀界面。例如, 当超构表面的透射相位 $\phi(r)$ 满足线性分布:

$$\phi(r) = \phi_0 + \xi r, \quad (11)$$

入射波在超构表面上的折射将满足广义斯涅耳定律^[12-15]:

$$\sin \theta_t n_t - \sin \theta_i n_i = \xi / k_0, \quad (12)$$

其中, ξ 是超构表面的透射相位梯度。式 (12) 意味着通过改变超构表面的相位梯度 ξ , 可以有效操控透射波的折射角, 形成异常折射。

得益于无反射超构表面对透射波高效调控的优势, 其为实现高效异常折射提供了重要平台。前文提到, 合理设计超构表面的微结构单元的材料和几何结构, 可以在零反射条件下实现对透射波相位的操控, 覆盖整个 $0 \sim 2\pi$ 范围, 从而实现对折射波传播方向的高效操控。基于这一折射调控思路, 在 2013 年, Pfeiffer 等人设计了一款微波频段的梯度惠更斯超构表面^[51], 其实验样品如图 6(a) 所示, 以 12 个拥有不同透射相位的微结构单元为一组, 沿 y 方向周期排布构成了该超构表面。实验结果 (图 6(a) 右图) 表明, 该梯度惠更斯超构表面可以有效地将垂直入射波偏折 45° , 在 9~12 GHz 频段内, 其效率最高可达 86%。次年, Pfeiffer 等人又设计了一款近红外波段的梯度惠更斯超构表面 (图 6(b))^[95], 由三层刻蚀在氧化硅衬底上的 30 nm 厚的金膜图案组成, 每层的金线和金圆盘产生电响应, 层间耦合诱导了等效磁响应。数值结果

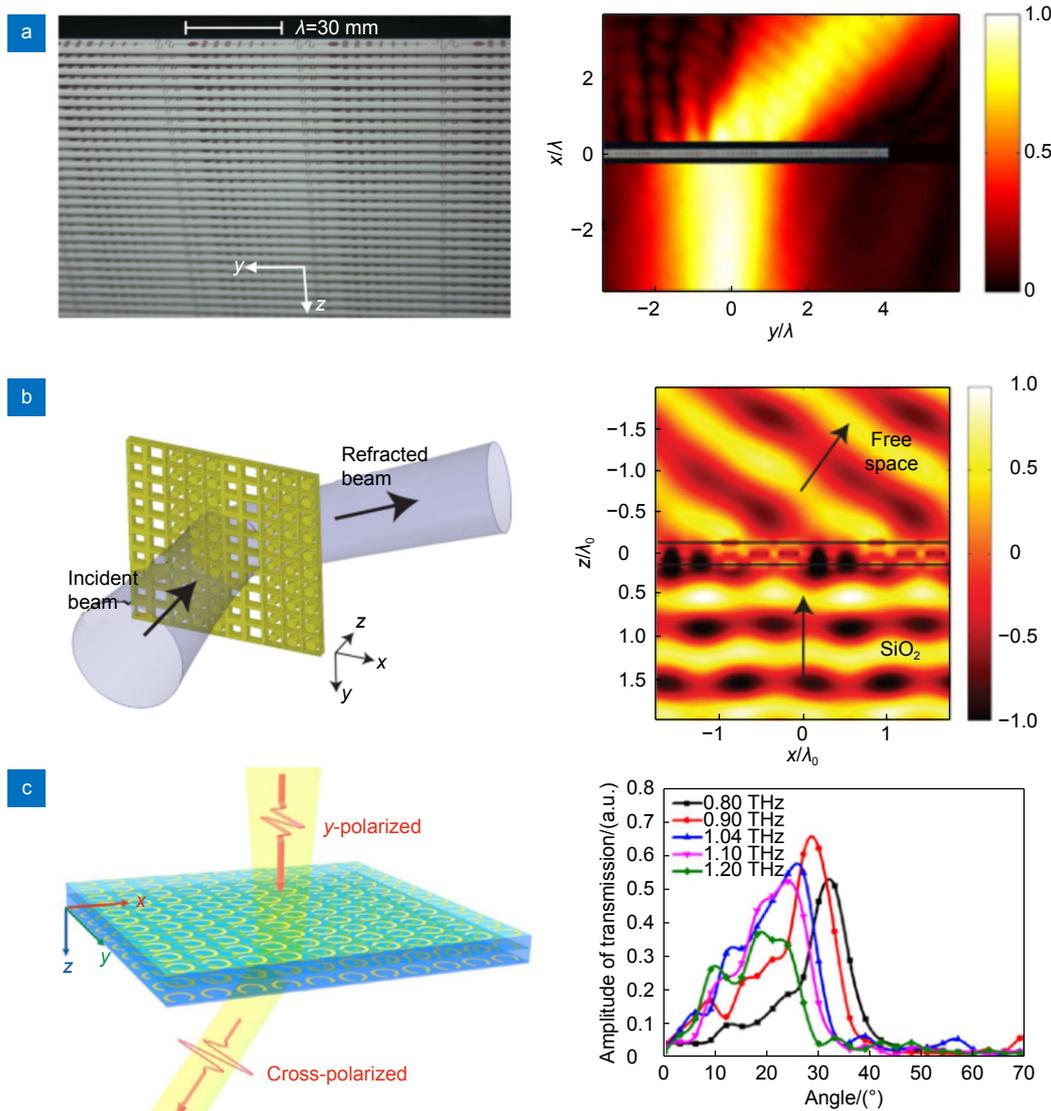


图 6 异常折射。(a) 微波频段的梯度惠更斯超构表面^[51]；(b) 近红外波段的梯度惠更斯超构表面^[95]；(c) 太赫兹频段的无反射的梯度编码超构表面^[193]

Fig. 6 Anomalous refraction. (a) Microwave gradient Huygens' metasurfaces^[51]; (b) Near-infrared gradient Huygens' metasurfaces^[95]; (c) Terahertz reflectionless gradient coding metasurfaces^[193]

(图 6(b) 右图) 表明, 该超构表面可以将底部氧化硅衬底中垂直入射的 $1.5 \mu\text{m}$ 波长的平面波偏折到 $\theta = 35.2^\circ$ 。由于金的欧姆损耗, 该超构表面的最高效率为 30%。

2016 年 Liu 等人设计了一款无反射的梯度编码超构表面, 同时实现了太赫兹波束的异常折射与偏振转化 (图 6(c))^[193]。该超构表面由三层旋转的开口金属环构成, 每层结构都可看作是具有特定表面电抗的等效表面电阻层, 通过级联三层超构表面, 可以在低反射条件下实现 $0\sim 2\pi$ 相位覆盖。此外, 该超构表面采用了无衬底结构, 从而避免了由衬底引起的强反射。进

一步地, 通过预先设计的编码序列来调整开口角和旋转方向, 可以有效调控相邻层之间的磁电耦合, 最终实现了较高效率的线性偏振转换。实验结果 (图 6(c) 右图) 表明, 在 1.04 THz 频率下, 该超构表面在将垂直入射波束偏折 26° 的同时实现了交叉偏振 (cross polarization) 转化, 透射效率最高为 58%。

异常折射利用的是超构表面上的线性透射相位梯度, 同理, 可以设计非线性的透射相位梯度, 来对电磁波波前进行灵活调控。例如, 利用如下的抛物线型的透射相位梯度, 可以实现对垂直入射波的聚焦效应:

$$\phi(r) = \frac{2\pi n_b f}{\lambda_0} - \frac{2\pi n_b \sqrt{f^2 + r^2}}{\lambda_0}, \quad (13)$$

其中, r 是超构表面上任一点到中心的距离, f 是焦距, λ_0 是真空波长, n_b 是背景介质折射率。根据式 (13), 通过合理设计的无反射超构表面可以实现高效聚焦成像功能^[67]。相比于依靠传播相位积累来折射光的传统光学透镜, 这种基于超构表面的新型透镜——超构透镜, 具有超薄的厚度、更高的集成度等优势^[60-71]。目前, 超构透镜已成为超构表面中相当重要且非常活跃的一个研究方向。

3.2 偏振操控

偏振是电磁波的一个重要特性, 对电磁波的偏振进行灵活调控具有广阔的应用前景。传统的偏振调控原理包括布儒斯特效应、双折射效应、光栅效应等, 但它们在某种程度上存在着调控效率不高、功能有限、体积大等问题。而无反射超构表面为透射波偏振的高效调控提供了新方案, 从微波到可见光, 研究人员提出了多种不同类型的偏振控制超构表面。超构表面对电磁波偏振调控的基本原理与双折射晶体对光波偏振调控原理类似, 即通过利用面内各向异性来改变正交

偏振波分量之间的相位延迟来实现。通过设计各向异性超构表面, 让不同极化的电磁波经过超构表面透射时, 具有可控的相位差 $\Delta\phi$, 即可实现对入射波偏振态的自由调控。

基于这一思路, 2013 年, Grady 等人设计了一款宽带、高效的太赫兹超构表面 (图 7(a))^[72], 由两个正交的金属光栅和中间的金属条组成, 金属光栅和金属条用聚酰亚胺间隔。该超构表面能够将透射波的偏振方向完全调控至入射波偏振的垂直方向, 即实现了交叉偏振转化。实验结果表明, 在 1.04 THz 频率下, 偏振转化效率高达 80%。2015 年, Fan 等人设计了一款可调控的太赫兹超构表面偏振转换器 (图 7(b))^[74], 由三层金属光栅组成, 偏振调控效应源于三层金属光栅间的多波干涉。由于三个光栅都可以自由旋转, 因此透射波偏振旋转角可以根据需求灵活调控。数值结果表明, 在 0.20~0.44 THz 频段内, 偏振转化效率高达 90%, 这一结果也在实验中得到了验证。

除线偏振外, 超构表面也能高效操控圆偏振的转化。例如, 2014 年, Pfeiffer 等人设计了一款三层金属结构的双各向异性超构表面 (图 7(c))^[73], 可以将从

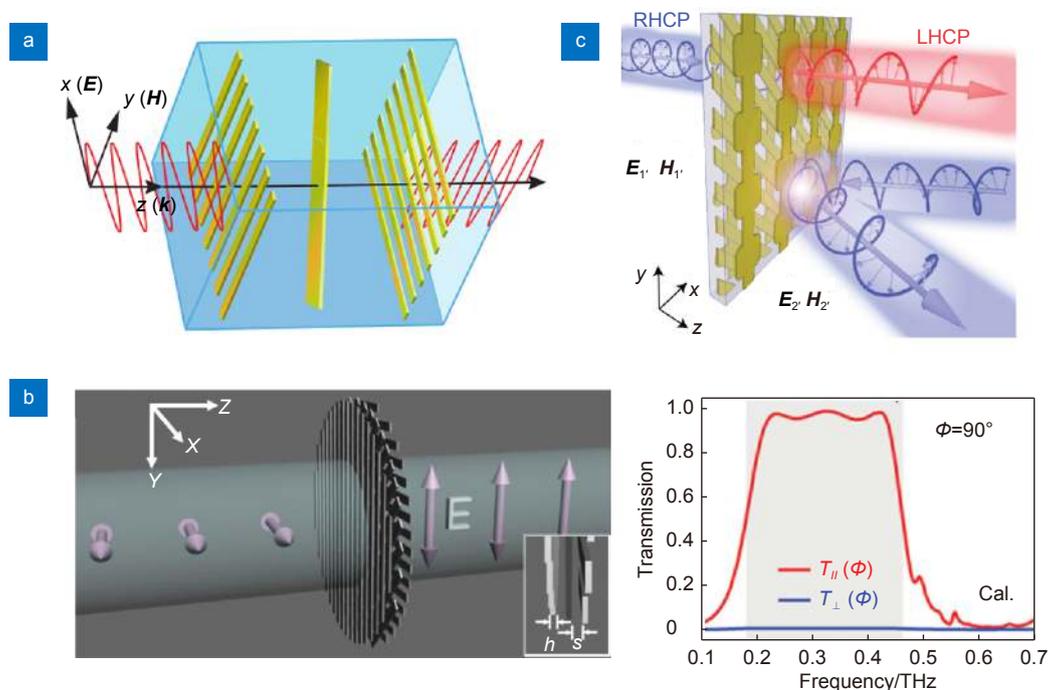


图 7 偏振操控。(a) 太赫兹各向异性超构表面偏振转换器^[72]; (b) 可调控的太赫兹各向异性超构表面偏振转换器^[74]; (c) 双各向异性超构表面偏振转换器^[73]

Fig. 7 Polarization manipulation. (a) Terahertz anisotropic metasurface as polarization converter^[72]; (b) Tunable terahertz anisotropic metasurface as polarization converter^[74]; (c) Bianisotropic metasurface as polarization converter^[73]

左侧入射的右旋圆偏振光转化为左旋圆偏振光。这一双各向异性超构表面在理论上可以实现 100% 的偏振转化效率，而在实际中，因为金属的欧姆损耗，近红外实验测得效率在 50% 左右。

3.3 超构减反膜

前文中讨论的无反射超构表面都处于对称环境中，即入射与出射区域的材料相同 (通常为空气)。如果两侧区域材料不一样，反射将会再次出现。有趣的是，研究人员发现通过调控超构表面中的电磁谐振，也可以在非对称环境下消除反射^[123,194-195]。在这种情况下，放置在两种不同材料界面上的超构表面可以看作是一种超构减反膜，它消除了原本存在于两个不同材料界面上的反射波。

2021 年, Lavigne 等人在理论上提出了一款双各向异性超构表面 (图 8(a))^[194], 由水平放置的双层 H 形金属结构构成, 在特定入射角下, 可以在两种任意不同介质的界面上同时消除 TE 和 TM 波的反射。同年, Zhang 等人设计了一款双各向异性超构表面 (图 8(b))^[195], 由水平放置的两种相互垂直的 S 形金属结构组成, 通过入射波在该金属结构上引起的感应电流可以实现对电谐振与磁谐振的独立调控。该超构表面可以同时消除 TE 波和 TM 波的反射, 且拥有较大的工作带宽与角度范围^[195], 这一结果在微波实验中也得到了验证。

上述研究专注于消除反射, 2021 年, Chu 等人提出了另一种超构减反膜^[123], 不仅可以消除界面反射, 还可以调控透射波波前 (图 8(c)), 使得入射波能够直

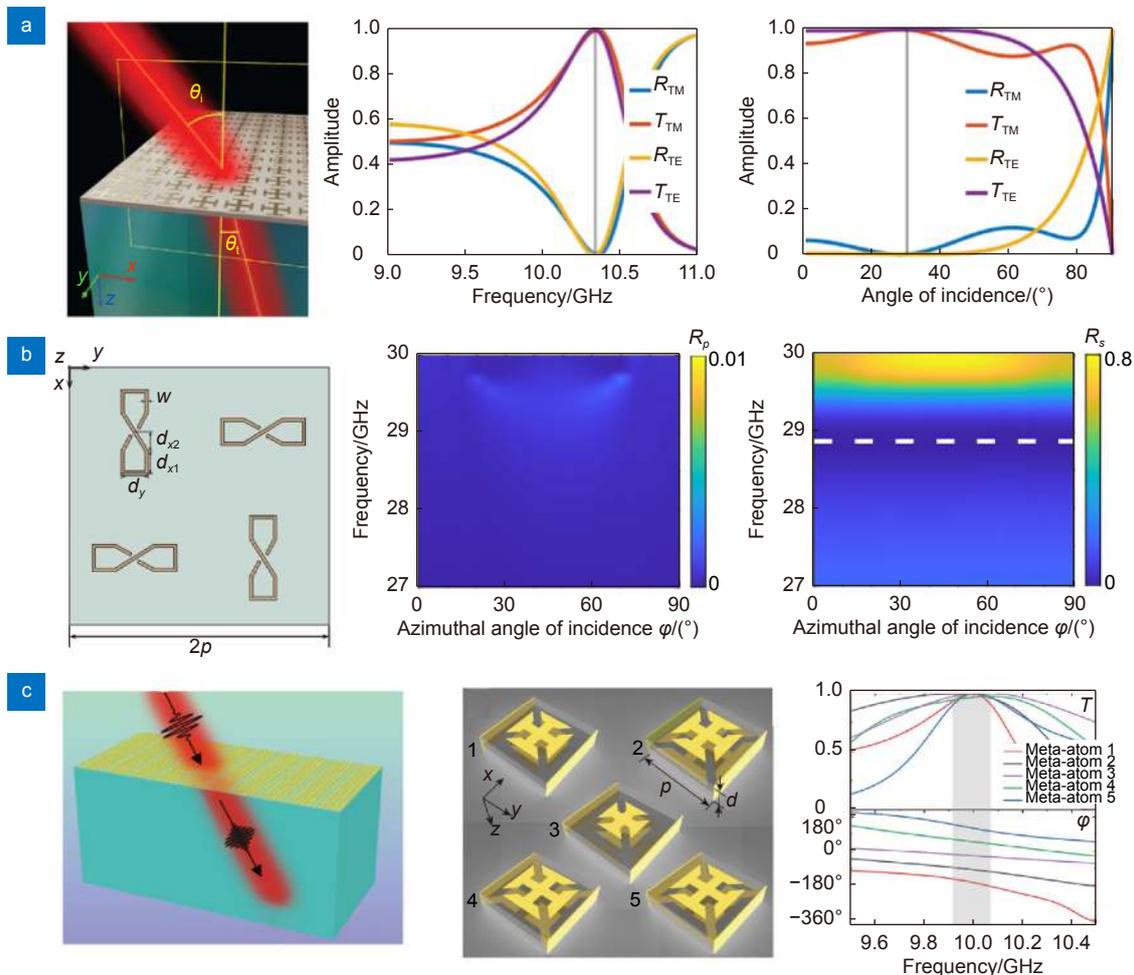


图 8 超构减反膜。(a) H 形金属结构构成的双各向异性超构减反膜^[194]; (b) S 形金属结构构成双各向异性超构减反膜^[195]; (c) 同时消除反射和调控波前的超构减反膜^[123]

Fig. 8 Meta-antireflection coatings. (a) Bianisotropic meta-antireflection coating using H-shaped metallic units^[194]; (b) Bianisotropic meta-antireflection coating using S-shaped metallic units^[195]; (c) Meta-antireflection coating for simultaneous reflection elimination and wavefront control^[123]

接穿透到超构表面下方的电介质基底中, 而没有折射效果 (即波束传播方向不产生折射), 就好像界面不存在一样。在某种意义上来看, 实现了界面的“隐形”。在微波实验中, 超构减反膜被放置在了自由空间和相对介电常数为 4.4 的电介质材料界面上, 在 10 GHz 频率下, 观察到了界面的“隐形”效果^[123]。

3.4 完美吸收

利用超构表面对电磁波无反射操控的另一个重要的应用是电磁波完美吸收。关于电磁波完美吸收的研究一直都是电磁领域的研究热点, 在电磁隐身、电磁屏蔽、降低电磁污染等方面有着广泛应用。通常情况下, 超构表面的等效阻抗不与空气阻抗匹配, 因而会导致电磁波的反射。前文提到, 超构表面可以看作是一个厚度很薄的均匀等效介质, 由等效相对介电常数 ϵ_{eff} 、等效相对磁导率 μ_{eff} 来描述。在这种情况下, 通过调控超构表面的微结构单元中的电谐振和磁谐振, 使其等效参数满足如下条件:

$$\eta_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{eff}}}{\mu_0 \mu_{\text{eff}}}} = \eta, \quad (14)$$

即可获得与空气匹配的阻抗, 从而消除反射。这里, ϵ_0 和 μ_0 分别为真空介电常数和磁导率。而要进一步实现电磁波完美吸收, 其等效参数 ϵ_{eff} 和 μ_{eff} 须为复数, 且虚部较大, 这样进入到超构表面中的电磁波能量能够通过欧姆损耗快速地耗散掉。

基于阻抗匹配这一思路, 2008 年, Landy 等人首次提出了完美吸波超构表面 (图 9(a))^[77], 由三层微结构单元构成, 顶层为金属开口谐振环结构, 提供了电谐振响应, 用以调控 ϵ_{eff} , 而磁谐振响应则是中间介质层中的磁场通过激发顶层开口谐振环的中心金属条与底层金属线中的反平行电流获得, 用以调控 μ_{eff} 。利用这一超构表面, Landy 在 11.65 GHz 频率下获得了高达 99% 的吸收率。这项开创性工作很快激起了一系列后续研究, 工作频率领域覆盖了从微波到可见光等各个频段。

然而, 谐振的本性决定了超构表面有限的吸收带

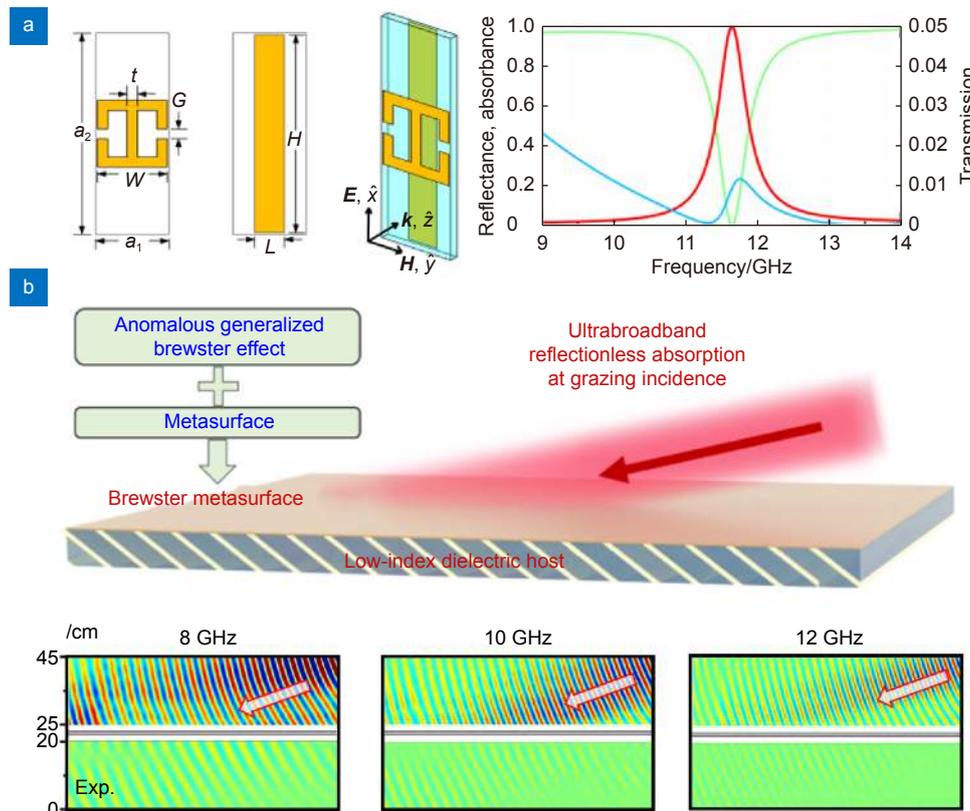


图 9 电磁波完美吸收。(a) 基于谐振型超构表面的电磁波完美吸收^[77];

(b) 基于非谐振型布儒斯特超构表面的超宽频电磁波完美吸收^[56]

Fig. 9 Perfect electromagnetic wave absorbers. (a) Resonant metasurfaces for perfect electromagnetic wave absorption^[77]; (b) Non-resonant Brewster metasurfaces for ultra-broadband perfect electromagnetic wave absorption^[56]

宽, 这大大地限制了吸波超构表面的应用范围, 尽管利用多个或者多层工作在相邻频点的复合谐振单元^[196-197], 拥有不同谐振频点的单个微结构单元^[198-200]、无序结构^[201-202]、梯度结构^[203]、色散调制^[204]等方法可以在一定程度上拓展吸收带宽, 但吸收带宽总是很有限。同时, 复杂的微结构给实际制备与应用带来了挑战。

为了彻底克服谐振导致的有限吸收带宽这一问题, 2021年Luo等人首次提出了一种非谐振机制的布儒斯特超构表面, 其原理在于反常布儒斯特效应(详见2.3小节)^[53-56], 因其非谐振本性, 所设计的布儒斯特超构表面拥有超大的吸收带宽, 原则上可以从准静场一直到光频段。2022年, Fan等人进一步提出了掠射下超宽频无反射的布儒斯特超构表面(图9(b))^[56], 由置于介质基底中的倾斜吸收薄膜阵列, 以及覆盖在介质基底上表面的吸收薄膜构成, 其中倾斜吸收薄膜阵列负责产生反常布儒斯特效应, 而覆盖在介质基底上表面的吸收薄膜则负责调控零反射角, 该零反射角原则上可以任意大。由于所设计的布儒斯特超构表面是由简单的非谐振结构单元构成, 其拥有超大的吸收带宽。微波实验结果表明(图9(b)下图), 在8 GHz、10 GHz和12 GHz三个频率下, 电磁波吸收率均接近100%^[56]。

综上所述, 无反射超构表面对电磁波有着高效的调控功能, 如异常透射、偏振操控、减反、完美吸收等。除此以外, 无反射超构表面还有望在未来被用于解决现有超构表面器件的透射效率不高这一问题, 例如对于超构透镜, 尽管研究人员现阶段主要关注的是其成像功能的提升和改善, 但在未来的实际应用场景中, 透射效率将是一个关键指标。因此, 无反射超构表面的应用在未来还将得到进一步拓展。

4 总结和展望

本文综述了近年来无反射电磁超构表面的发展现状, 从机理出发介绍了惠更斯超构表面、多层结构的无反射超构表面、布儒斯特超构表面等不同类型的无反射电磁超构表面, 讨论了拓展无反射角度范围与频率带宽的机理与方法。目前, 无反射电磁超构表面已经在异常折射、偏振调控、超构减反膜和电磁波完美吸收等方面展现出了重要的实际应用价值。

未来, 更多的新物理效应与新应用仍需进一步探索。例如, 能够同时实现全偏振、全角度、超宽频无

反射特性的新机理的研究, 以及可重构、多功能、高效率超构表面器件相关的新应用与新器件的开发。需要指出的是, 无反射电磁超构表面的发展对实验制造技术提出了更大的挑战。一方面, 需要尽可能降低材料的吸收损耗, 尤其是在光频段, 既要求微结构拥有强的电磁谐振响应, 又要求其电磁损耗尽量小。另一方面, 由于超构表面微结构单元的电磁响应通常对其关键物理量的变化非常敏感, 微小的偏差就会导致超构表面效率的显著降低, 因此, 无反射超构表面给精准制造提出了更高的要求。此外, 人工智能和深度学习技术可以显著提高超构表面的设计效率, 与传统方法相比, 深度学习算法具有分析处理大量数据的能力^[89,205-213]。深度学习技术通过从大型数据集中学习模型变量之间的复杂关系来对未知问题进行预测, 可以在短时间内从海量数据中找到最优解, 达到更高的精度, 实现更巧妙的设计。基于深度学习算法的逆向设计给予了研究人员全新的手段来设计与优化拥有多参数自由度的超构表面, 有望实现超构表面的无反射特性的按需逆向设计, 这将大大提高相关电磁/光学器件的设计与优化效率。

简而言之, 无反射电磁超构表面不仅为研究基础电磁理论提供了一个重要平台, 同时也为研发高效率电磁器件奠定了重要的理论与材料基础。在未来, 无反射电磁超构表面仍将是超构表面领域的重要研究方向之一。

参考文献

- [1] Cui T J, Smith D R, Liu R P. *Metamaterials: Theory, Design, and Applications*[M]. New York: Springer, 2010.
- [2] Cai W S, Shalaev V. *Optical Metamaterials*[M]. New York: Springer, 2010.
- [3] Zheludev N I, Kivshar Y S. From metamaterials to metadevices[J]. *Nat Mater*, 2012, 11(11): 917-924.
- [4] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. *Sov Phys Usp*, 1968, 10(4): 509-514.
- [5] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. *Phys Rev Lett*, 2000, 85(18): 3966-3969.
- [6] Zhang X, Liu Z W. Superlenses to overcome the diffraction limit[J]. *Nat Mater*, 2008, 7(6): 435-441.
- [7] Lu D, Liu Z W. Hyperlenses and metalenses for far-field super-resolution imaging[J]. *Nat Commun*, 2012, 3(1): 1205.
- [8] Pendry J B, Schurig D, Smith D R. Controlling electromagnetic fields[J]. *Science*, 2006, 312(5781): 1780-1782.
- [9] Schurig D, Mock J J, Justice B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. *Science*, 2006, 314(5801): 977-980.
- [10] Leonhardt U. Optical conformal mapping[J]. *Science*, 2006,

- 312(5781): 1777–1780.
- [11] Lai Y, Chen H Y, Zhang Z Q, et al. Complementary media invisibility cloak that cloaks objects at a distance outside the cloaking shell[J]. *Phys Rev Lett*, 2009, **102**(9): 093901.
- [12] 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.
- [13] Ni X J, Emani N K, Kildishev A V, et al. Broadband light bending with plasmonic nanoantennas[J]. *Science*, 2012, **335**(6067): 427.
- [14] Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaev V M. Planar photonics with metasurfaces[J]. *Science*, 2013, **339**(6125): 1232009.
- [15] Yu N F, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces[J]. *Nat Mater*, 2014, **13**(2): 139–150.
- [16] Meinzer N, Barnes W L, Hooper I R. Plasmonic meta-atoms and metasurfaces[J]. *Nat Photonics*, 2014, **8**(12): 889–898.
- [17] Turpin J P, Bossard J A, Morgan K L, et al. Reconfigurable and tunable metamaterials: a review of the theory and applications[J]. *Int J Antennas Propag*, 2014, **2014**: 429837.
- [18] Cheng H, Liu Z C, Chen S Q, et al. Emergent functionality and controllability in few-layer metasurfaces[J]. *Adv Mater*, 2015, **27**(36): 5410–5421.
- [19] Walia S, Shah C M, Gutruf P, et al. Flexible metasurfaces and metamaterials: a review of materials and fabrication processes at micro- and nano-scales[J]. *Appl Phys Rev*, 2015, **2**(1): 011303.
- [20] Pu M B, Li X, Ma X L, et al. Catenary optics for achromatic generation of perfect optical angular momentum[J]. *Sci Adv*, 2015, **1**(9): e1500396.
- [21] Luo X G. Principles of electromagnetic waves in metasurfaces[J]. *Sci China Phys Mech Astron*, 2015, **58**(9): 594201.
- [22] Chen H T, Taylor A J, Yu N F. A review of metasurfaces: physics and applications[J]. *Rep Prog Phys*, 2016, **79**(7): 076401.
- [23] Zhang L, Mei S T, Huang K, et al. Advances in full control of electromagnetic waves with metasurfaces[J]. *Adv Opt Mater*, 2016, **4**(6): 818–833.
- [24] Glybovski S B, Tretyakov S A, Belov P A, et al. Metasurfaces: from microwaves to visible[J]. *Phys Rep*, 2016, **634**: 1–72.
- [25] Xu Y D, Fu Y Y, Chen H Y. Planar gradient metamaterials[J]. *Nat Rev Mater*, 2016, **1**(12): 16067.
- [26] Liu S, Cui T J. Concepts, working principles, and applications of coding and programmable metamaterials[J]. *Adv Opt Mater*, 2017, **5**(22): 1700624.
- [27] Genevet P, Capasso F, Aieta F, et al. Recent advances in planar optics: from plasmonic to dielectric metasurfaces[J]. *Optica*, 2017, **4**(1): 139–152.
- [28] Kamali S M, Arbabi E, Arbabi A, et al. A review of dielectric optical metasurfaces for wavefront control[J]. *Nanophotonics*, 2018, **7**(6): 1041–1068.
- [29] He Q, Sun S L, Xiao S Y, et al. High-efficiency metasurfaces: principles, realizations, and applications[J]. *Adv Opt Mater*, 2018, **6**(19): 1800415.
- [30] Minovich A E, Miroshnichenko A E, Bykov A Y, et al. Functional and nonlinear optical metasurfaces[J]. *Laser Photonics Rev*, 2015, **9**(2): 195–213.
- [31] Li G X, Zhang S, Zentgraf T. Nonlinear photonic metasurfaces[J]. *Nat Rev Mater*, 2017, **2**(5): 17010.
- [32] Krasnok A, Tymchenko M, Alù A. Nonlinear metasurfaces: a paradigm shift in nonlinear optics[J]. *Mater Today*, 2018, **21**(1): 8–21.
- [33] Neshev D, Aharonovich I. Optical metasurfaces: new generation building blocks for multi-functional optics[J]. *Light Sci Appl*, 2018, **7**(1): 58.
- [34] Xie X, Li X, Pu M B, et al. Plasmonic metasurfaces for simultaneous thermal infrared invisibility and holographic illusion[J]. *Adv Funct Mater*, 2018, **28**(14): 1706673.
- [35] Sun S L, He Q, Hao J M, et al. Electromagnetic metasurfaces: physics and applications[J]. *Adv Opt Photonics*, 2019, **11**(2): 380–479.
- [36] Shaltout A M, Shalaev V M, Brongersma M L. Spatiotemporal light control with active metasurfaces[J]. *Science*, 2019, **364**(6441): eaat3100.
- [37] Cui T, Bai B F, Sun H B. Tunable metasurfaces based on active materials[J]. *Adv Funct Mater*, 2019, **29**(10): 1806692.
- [38] Hu Y Q, Wang X D, Luo X H, et al. All-dielectric metasurfaces for polarization manipulation: principles and emerging applications[J]. *Nanophotonics*, 2020, **9**(12): 3755–3780.
- [39] Zang X F, Yao B S, Chen L, et al. Metasurfaces for manipulating terahertz waves[J]. *Light Adv Manuf*, 2021, **2**: 10.
- [40] Xie X, Pu M B, Jin J J, et al. Generalized pancharathnam-berry phase in rotationally symmetric meta-atoms[J]. *Phys Rev Lett*, 2021, **126**(18): 183902.
- [41] Guo Y H, Zhang S C, Pu M B, et al. Spin-decoupled metasurface for simultaneous detection of spin and orbital angular momenta via momentum transformation[J]. *Light Sci Appl*, 2021, **10**(1): 63.
- [42] Du K, Barkaoui H, Zhang X D, et al. Optical metasurfaces towards multifunctionality and tunability[J]. *Nanophotonics*, 2022, **11**(9): 1761–1781.
- [43] Yang G, Guo Y H, Pu M B, et al. Miniature computational spectral detection technology based on correlation value selection[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(10): 220130. 杨港, 郭迎辉, 蒲明博, 等. 基于相关性选择的微型计算光谱探测技术[J]. *光电工程*, 2022, **49**(10): 220130.
- [44] Epstein A, Eleftheriades G V. Huygens' metasurfaces via the equivalence principle: design and applications[J]. *J Opt Soc Am B*, 2016, **33**(2): A31–A49.
- [45] Chen M, Kim M, Wong A M H, et al. Huygens' metasurfaces from microwaves to optics: a review[J]. *Nanophotonics*, 2018, **7**(6): 1207–1231.
- [46] Ataloglou V G, Chen M, Kim M, et al. Microwave Huygens' metasurfaces: fundamentals and applications[J]. *IEEE J Microw*, 2021, **1**(1): 374–388.
- [47] Huang L L, Chen X Z, Mühlenbernd H, et al. Dispersionless phase discontinuities for controlling light propagation[J]. *Nano Lett*, 2012, **12**(11): 5750–5755.
- [48] Sun S L, He Q, Xiao S Y, et al. Gradient-index meta-surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves[J]. *Nat Mater*, 2012, **11**(5): 426–431.
- [49] Liu S, Cui T J, Xu Q, et al. Anisotropic coding metamaterials and their powerful manipulation of differently polarized terahertz waves[J]. *Light Sci Appl*, 2016, **5**(5): e16076.
- [50] Cui T J, Qi M Q, Wan X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. *Light Sci Appl*, 2014, **3**(10): e218.
- [51] Pfeiffer C, Grbic A. Metamaterial Huygens' surfaces: tailoring wave fronts with reflectionless sheets[J]. *Phys Rev Lett*, 2013, **110**(19): 197401.
- [52] Pfeiffer C, Grbic A. Millimeter-wave transmitarrays for wavefront and polarization control[J]. *IEEE Trans Microwave*

- Theory Techn*, 2013, **61**(12): 4407–4417.
- [53] Luo J, Chu H C, Peng R W, et al. Ultra-broadband reflectionless Brewster absorber protected by reciprocity[J]. *Light Sci Appl*, 2021, **10**(1): 89.
- [54] Fan H Y, Li J S, Lai Y, et al. Optical Brewster metasurfaces exhibiting ultrabroadband reflectionless absorption and extreme angular asymmetry[J]. *Phys Rev Appl*, 2021, **16**(4): 044064.
- [55] Ma Z K, Fan H Y, Zhou H, et al. Broadband perfect transparency-to-absorption switching in tilted anisotropic metamaterials based on the anomalous Brewster effect[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(24): 39186–39199.
- [56] Fan H Y, Chu H C, Luo H, et al. Brewster metasurfaces for ultrabroadband reflectionless absorption at grazing incidence[J]. *Optica*, 2022, **9**(10): 1138–1148.
- [57] Huang L L, Chen X Z, Bai B F, et al. Helicity dependent directional surface plasmon polariton excitation using a metasurface with interfacial phase discontinuity[J]. *Light Sci Appl*, 2013, **2**(3): e70.
- [58] Pors A, Nielsen M G, Bernardin T, et al. Efficient unidirectional polarization-controlled excitation of surface plasmon polaritons[J]. *Light Sci Appl*, 2014, **3**(8): e197.
- [59] Sun W J, He Q, Sun S L, et al. High-efficiency surface plasmon meta-couplers: concept and microwave-regime realizations[J]. *Light Sci Appl*, 2016, **5**(1): e16003.
- [60] Chen H T, Zhou J F, O'Hara J F, et al. Antireflection coating using metamaterials and identification of its mechanism[J]. *Phys Rev Lett*, 2010, **105**(7): 073901.
- [61] Kang M, Feng T H, Wang H T, et al. Wave front engineering from an array of thin aperture antennas[J]. *Opt Express*, 2012, **20**(14): 15882–15890.
- [62] 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 Lett*, 2012, **12**(9): 4932–4936.
- [63] Lin D M, Fan P Y, Hasman E, et al. Dielectric gradient metasurface optical elements[J]. *Science*, 2014, **345**(6194): 298–302.
- [64] 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.
- [65] Arbabi A, Horie Y, Ball A J, et al. Subwavelength-thick lenses with high numerical apertures and large efficiency based on high-contrast transmitarrays[J]. *Nat Commun*, 2015, **6**(1): 7069.
- [66] Khorasaninejad M, Capasso F. Metalenses: versatile multifunctional photonic components[J]. *Science*, 2017, **358**(6367): eaam8100.
- [67] Chen K, Feng Y J, Monticone F, et al. A reconfigurable active Huygens' metalens[J]. *Adv Mater*, 2017, **29**(17): 1606422.
- [68] Wang S M, Wu P C, Su V C, et al. A broadband achromatic metalens in the visible[J]. *Nat Nanotechnol*, 2018, **13**(3): 227–232.
- [69] Lin R J, Su V C, Wang S M, et al. Achromatic metalens array for full-colour light-field imaging[J]. *Nat Nanotechnol*, 2019, **14**(3): 227–231.
- [70] Li L, Liu Z X, Ren X F, et al. Metalens-array-based high-dimensional and multiphoton quantum source[J]. *Science*, 2020, **368**(6498): 1487–1490.
- [71] Pan M Y, Fu Y F, Zheng M J, et al. Dielectric metalens for miniaturized imaging systems: progress and challenges[J]. *Light Sci Appl*, 2022, **11**(1): 195.
- [72] Grady N K, Heyes J E, Chowdhury D R, et al. Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction[J]. *Science*, 2013, **340**(6138): 1304–1307.
- [73] Pfeiffer C, Zhang C, Ray V, et al. High performance bianisotropic metasurfaces: asymmetric transmission of light[J]. *Phys Rev Lett*, 2014, **113**(2): 023902.
- [74] Fan R H, Zhou Y, Ren X P, et al. Freely tunable broadband polarization rotator for terahertz waves[J]. *Adv Mater*, 2015, **27**(7): 1201–1206.
- [75] Xu H X, Tang S W, Wang G M, et al. Multifunctional microstrip array combining a linear polarizer and focusing metasurface[J]. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2016, **64**(8): 3676–3682.
- [76] Ma X L, Pu M B, Li X, et al. All-metallic wide-angle metasurfaces for multifunctional polarization manipulation[J]. *Opto-Electron Adv*, 2019, **2**(3): 180023.
- [77] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. *Phys Rev Lett*, 2008, **100**(20): 207402.
- [78] Chen H T, O'Hara J F, Azad A K, et al. Manipulation of terahertz radiation using metamaterials[J]. *Laser Photonics Rev*, 2011, **5**(4): 513–533.
- [79] Watts C M, Liu X L, Padilla W J. Metamaterial electromagnetic wave absorbers[J]. *Adv Mater*, 2012, **24**(23): OP98–OP120.
- [80] Cui Y X, He Y R, Jin Y, et al. Plasmonic and metamaterial structures as electromagnetic absorbers[J]. *Laser Photonics Rev*, 2014, **8**(4): 495–520.
- [81] Ra'di Y, Simovski C R, Tretyakov S A. Thin perfect absorbers for electromagnetic waves: theory, design, and realizations[J]. *Phys Rev Appl*, 2015, **3**(3): 037001.
- [82] Alaei R, Albooyeh M, Rockstuhl C. Theory of metasurface based perfect absorbers[J]. *J Phys D:Appl Phys*, 2017, **50**(50): 503002.
- [83] Feng L, Huo P C, Liang Y Z, et al. Photonic metamaterial absorbers: morphology engineering and interdisciplinary applications[J]. *Adv Mater*, 2020, **32**(27): 1903787.
- [84] Lan X, Deng Q R, Zhang W T, et al. Efficient chiral absorber based on twisted catenary structure[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(10): 220157.
- 蓝翔, 邓钦荣, 张汶婷, 等. 基于扭转悬链线结构的高效手性吸波器[J]. *光电工程*, 2022, **49**(10): 220157.
- [85] 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.
- [86] Sounas D L, Fleury R, Alù A. Unidirectional cloaking based on metasurfaces with balanced loss and gain[J]. *Phys Rev Appl*, 2015, **4**(1): 014005.
- [87] Chu H C, Li Q, Liu B B, et al. A hybrid invisibility cloak based on integration of transparent metasurfaces and zero-index materials[J]. *Light Sci Appl*, 2018, **7**(1): 50.
- [88] Huang Y J, Pu M B, Zhang F, et al. Broadband functional metasurfaces: achieving nonlinear phase generation toward achromatic surface cloaking and lensing[J]. *Adv Opt Mater*, 2019, **7**(7): 1801480.
- [89] Luo J, Li X, Zhang X Y, et al. Deep-learning-enabled inverse engineering of multi-wavelength invisibility-to-superscattering switching with phase-change materials[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(7): 10527–10537.

- [90] Cai T, Wang G M, Tang S W, et al. High-efficiency and full-space manipulation of electromagnetic wave fronts with metasurfaces[J]. *Phys Rev Appl*, 2017, **8**(3): 034033.
- [91] Akram M R, Mehmood M Q, Bai X D, et al. High efficiency ultrathin transmissive metasurfaces[J]. *Adv Opt Mater*, 2019, **7**(11): 1801628.
- [92] Decker M, Staude I, Falkner M, et al. High-efficiency dielectric Huygens' surfaces[J]. *Adv Opt Mater*, 2015, **3**(6): 813–820.
- [93] Selvanayagam M, Eleftheriades G V. Discontinuous electromagnetic fields using orthogonal electric and magnetic currents for wavefront manipulation[J]. *Opt Express*, 2013, **21**(12): 14409–14429.
- [94] Wong J P S, Selvanayagam M, Eleftheriades G V. Design of unit cells and demonstration of methods for synthesizing Huygens metasurfaces[J]. *Photonics Nanostruct Fundam Appl*, 2014, **12**(4): 360–375.
- [95] Pfeiffer C, Emani N K, Shaltout A M, et al. Efficient light bending with isotropic metamaterial Huygens' surfaces[J]. *Nano Lett*, 2014, **14**(5): 2491–2497.
- [96] Chen W T, Yang K Y, Wang C M, et al. High-efficiency broadband meta-hologram with polarization-controlled dual images[J]. *Nano Lett*, 2014, **14**(1): 225–230.
- [97] Kim M, Wong A M H, Eleftheriades G V. Optical Huygens' metasurfaces with independent control of the magnitude and phase of the local reflection coefficients[J]. *Phys Rev X*, 2014, **4**(4): 041042.
- [98] Sautter J, Staude I, Decker M, et al. Active tuning of all-dielectric metasurfaces[J]. *ACS Nano*, 2015, **9**(4): 4308–4315.
- [99] Asadchy V S, Faniayev I A, Ra'di Y, et al. Broadband reflectionless metasheets: frequency-selective transmission and perfect absorption[J]. *Phys Rev X*, 2015, **5**(3): 031005.
- [100] Asadchy V S, Ra'di Y, Vehmas J, et al. Functional metamirrors using bianisotropic elements[J]. *Phys Rev Lett*, 2015, **114**(9): 095503.
- [101] Wong J P S, Selvanayagam M, Eleftheriades G V. Polarization considerations for scalar Huygens metasurfaces and characterization for 2-D refraction[J]. *IEEE Trans Microwave Theory Techn*, 2015, **63**(3): 913–924.
- [102] Iyer P P, Butakov N A, Schuller J A. Reconfigurable semiconductor phased-array metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2015, **2**(8): 1077–1084.
- [103] Chong K E, Wang L, Staude I, et al. Efficient polarization-insensitive complex wavefront control using Huygens' metasurfaces based on dielectric resonant meta-atoms[J]. *ACS Photonics*, 2016, **3**(4): 514–519.
- [104] Paniagua-Domínguez R, Yu Y F, Miroshnichenko A E, et al. Generalized Brewster effect in dielectric metasurfaces[J]. *Nat Commun*, 2016, **7**(1): 10362.
- [105] Babicheva V E, Evlyukhin A B. Resonant lattice Kerker effect in metasurfaces with electric and magnetic optical responses[J]. *Laser Photonics Rev*, 2017, **11**(6): 1700132.
- [106] Wong A M H, Christian P, Eleftheriades G V. Binary Huygens' metasurfaces: experimental demonstration of simple and efficient near-grazing retroreflectors for TE and TM polarizations[J]. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2018, **66**(6): 2892–2903.
- [107] Abujetas D R, Sánchez-Gil J A, Sáenz J J. Generalized Brewster effect in high-refractive-index nanorod-based metasurfaces[J]. *Opt Express*, 2018, **26**(24): 31523–31541.
- [108] Liu W, Kivshar Y S. Generalized Kerker effects in nanophotonics and meta-optics [Invited][J]. *Opt Express*, 2018, **26**(10): 13085–13105.
- [109] Wong A M H, Eleftheriades G V. Perfect anomalous reflection with a bipartite Huygens' metasurface[J]. *Phys Rev X*, 2018, **8**(1): 011036.
- [110] Chen M, Abdo-Sánchez E, Epstein A, et al. Theory, design, and experimental verification of a reflectionless bianisotropic Huygens' metasurface for wide-angle refraction[J]. *Phys Rev B*, 2018, **97**(12): 125433.
- [111] Kwon D H, Ptitsyn G, Díaz-Rubio A, et al. Transmission magnitude and phase control for polarization-preserving reflectionless metasurfaces[J]. *Phys Rev Appl*, 2018, **9**(3): 034005.
- [112] Liu C, Chen L, Wu T S, et al. All-dielectric three-element transmissive Huygens' metasurface performing anomalous refraction[J]. *Photonics Res*, 2019, **7**(12): 1501–1510.
- [113] Chen M, Epstein A, Eleftheriades G V. Design and experimental verification of a passive Huygens' metasurface lens for gain enhancement of frequency-scanning slotted-waveguide antennas[J]. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2019, **67**(7): 4678–4692.
- [114] Sun Z W, Sima B, Zhao J M, et al. Electromagnetic polarization conversion based on Huygens' metasurfaces with coupled electric and magnetic resonances[J]. *Opt Express*, 2019, **27**(8): 11006–11017.
- [115] Lin Z M, Li X W, Zhao R Z, et al. High-efficiency Bessel beam array generation by Huygens' metasurfaces[J]. *Nanophotonics*, 2019, **8**(6): 1079–1085.
- [116] Hao W M, Deng M, Chen S Q, et al. High-efficiency generation of airy beams with Huygens' metasurface[J]. *Phys Rev Appl*, 2019, **11**(5): 054012.
- [117] Fathnan A A, Liu M K, Powell D A. Achromatic Huygens' metalenses with deeply subwavelength thickness[J]. *Adv Opt Mater*, 2020, **8**(22): 2000754.
- [118] Rahimzadegan A, Arslan D, Dams D, et al. Beyond dipolar Huygens' metasurfaces for full-phase coverage and unity transmittance[J]. *Nanophotonics*, 2020, **9**(1): 75–82.
- [119] Chen M, Eleftheriades G V. Omega-bianisotropic wire-loop Huygens' metasurface for reflectionless wide-angle refraction[J]. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2020, **68**(3): 1477–1490.
- [120] Howes A, Zhu Z H, Curie D, et al. Optical limiting based on Huygens' metasurfaces[J]. *Nano Lett*, 2020, **20**(6): 4638–4644.
- [121] Wang Z C, Liu J, Ding X M, et al. Three-dimensional microwave holography based on broadband Huygens' metasurface[J]. *Phys Rev Appl*, 2020, **13**(1): 014033.
- [122] Ang P, Xu G Y, Eleftheriades G V. Invisibility cloaking with passive and active Huygens's metasurfaces[J]. *Appl Phys Lett*, 2021, **118**(7): 071903.
- [123] Chu H C, Zhang H Y, Zhang Y, et al. Invisible surfaces enabled by the coalescence of anti-reflection and wavefront controllability in ultrathin metasurfaces[J]. *Nat Commun*, 2021, **12**(1): 4523.
- [124] Song W T, Liang X N, Li S Q, et al. Large-scale Huygens' metasurfaces for holographic 3D near-eye displays[J]. *Laser Photonics Rev*, 2021, **15**(9): 2000538.
- [125] Derafshi I, Komjani N. A new high aperture efficiency transmitarray antenna based on Huygens metasurfaces[J]. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2022, **70**(7): 5458–5467.
- [126] Zhang T, Duan Y P, Huang L X, et al. Huygens' metasurface

- based on induced magnetism: enhance the microwave absorption performance of magnetic coating[J]. *Adv Mater Interfaces*, 2022, **9**(12): 2102559.
- [127] Yang Z W, Liu M K, Komar A, et al. Phase - only tuning of extreme Huygens metasurfaces enabled by optical anisotropy[J]. *Adv Opt Mater*, 2022, **10**(2): 2101893.
- [128] Li H J, Wei G G, Zhou H M, et al. Polarization-independent near-infrared superabsorption in transition metal dichalcogenide Huygens metasurfaces by degenerate critical coupling[J]. *Phys Rev B*, 2022, **105**(16): 165305.
- [129] Hassanfiroozi A, Cheng Y C, Huang S H, et al. Toroidal - assisted generalized Huygens' sources for highly transmissive plasmonic metasurfaces[J]. *Laser Photonics Rev*, 2022, **16**(6): 2100525.
- [130] Song W T, Liang X N, Li S Q, et al. Retinal projection near - eye displays with Huygens' metasurfaces[J]. *Adv Opt Mater*, 2023, **11**(5): 2202348.
- [131] Epstein A, Eleftheriades G V. Arbitrary power-conserving field transformations with passive lossless omega-type bianisotropic metasurfaces[J]. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2016, **64**(9): 3880–3895.
- [132] Kerker M, Wang D S, Giles C L. Electromagnetic scattering by magnetic spheres[J]. *J Opt Soc Am*, 1983, **73**(6): 765–767.
- [133] Yang J Y, Gurung S, Bej S, et al. Active optical metasurfaces: comprehensive review on physics, mechanisms, and prospective applications[J]. *Rep Prog Phys*, 2022, **85**(3): 036101.
- [134] Berreman D W. Optics in stratified and anisotropic media: 4×4-matrix formulation[J]. *J Opt Soc Am*, 1972, **62**(4): 502–510.
- [135] Luo J, Lu W X, Hang Z H, et al. Arbitrary control of electromagnetic flux in inhomogeneous anisotropic media with near-zero index[J]. *Phys Rev Lett*, 2014, **112**(7): 073903.
- [136] Luo J, Hang Z H, Chan C T, et al. Unusual percolation threshold of electromagnetic waves in double-zero medium embedded with random inclusions[J]. *Laser Photonics Rev*, 2015, **9**(5): 523–529.
- [137] Liberal I, Engheta N. Near-zero refractive index photonics[J]. *Nat Photonics*, 2017, **11**(3): 149–158.
- [138] Niu X X, Hu X Y, Chu S S, et al. Epsilon-near-zero photonics: a new platform for integrated devices[J]. *Adv Opt Mater*, 2018, **6**(10): 1701292.
- [139] Kinsey N, Devault C, Boltasseva A, et al. Near-zero-index materials for photonics[J]. *Nat Rev Mater*, 2019, **4**(12): 742–760.
- [140] Li Y, Chan C T, Mazur E. Dirac-like cone-based electromagnetic zero-index metamaterials[J]. *Light Sci Appl*, 2021, **10**(1): 203.
- [141] Luo J, Lai Y. Hermitian and non-hermitian dirac-like cones in photonic and phononic structures[J]. *Front Phys*, 2022, **10**: 845624.
- [142] Ji W J, Luo J, Chu H C, et al. Crosstalk prohibition at the deep-subwavelength scale by epsilon-near-zero claddings[J]. *Nanophotonics*, 2023, **12**(11): 2007–2017.
- [143] Brewster D. IX. On the laws which regulate the polarisation of light by reflexion from transparent bodies. By David Brewster, LL. D. F. R. S. Edin. and F. S. A. Edin. In a letter addressed to Right Hon. Sir Joseph Banks, Bart. K. B. P. R. S[J]. *Philos Trans Roy Soc London*, 1815, **105**: 125–159.
- [144] Mahlein H F. Generalized Brewster-angle conditions for quarter-wave multilayers at non-normal incidence[J]. *J Opt Soc Am*, 1974, **64**(5): 647–653.
- [145] Lakhtakia A. Would Brewster recognize today's Brewster angle?[J]. *Opt News*, 1989, **15**(6): 14–18.
- [146] Wang C, Zhu Z B, Cui W Z, et al. All-angle Brewster effect observed on a terahertz metasurface[J]. *Appl Phys Lett*, 2019, **114**(19): 191902.
- [147] Hua J Y, Hua E K, Zhou F B, et al. Foveated glasses-free 3D display with ultrawide field of view via a large-scale 2D-metagrating complex[J]. *Light Sci Appl*, 2021, **10**(1): 213.
- [148] Kim I, Martins R J, Jang J, et al. Nanophotonics for light detection and ranging technology[J]. *Nat Nanotechnol*, 2021, **16**(5): 508–524.
- [149] Luo J, Yang Y T, Yao Z Q, et al. Ultratransparent media and transformation optics with shifted spatial dispersions[J]. *Phys Rev Lett*, 2016, **117**(22): 223901.
- [150] Liu Y C, Wang G P, Zhang S. A nonlocal effective medium description of topological weyl metamaterials[J]. *Laser Photonics Rev*, 2021, **15**(10): 2100129.
- [151] Song T T, Chu H C, Luo J, et al. Ultracompact photonic circuits without cladding layers[J]. *Phys Rev X*, 2022, **12**(1): 011053.
- [152] Lv Q H, Jin C, Zhang B C, et al. Ultrawide - angle ultralow - reflection phenomenon for transverse electric mode in anisotropic metasurface[J]. *Adv Opt Mater*, 2022, **10**(12): 2102400.
- [153] Tamayama Y, Nakanishi T, Sugiyama K, et al. Observation of Brewster's effect for transverse-electric electromagnetic waves in metamaterials: experiment and theory[J]. *Phys Rev B*, 2006, **73**(19): 193104.
- [154] Yao Z Q, Luo J, Lai Y. Illusion optics via one-dimensional ultratransparent photonic crystals with shifted spatial dispersions[J]. *Opt Express*, 2017, **25**(25): 30931–30938.
- [155] Xu L, Chen H Y. Transformation metamaterials[J]. *Adv Mater*, 2021, **33**(52): 2005489.
- [156] Chu Z T, Li T F, Wang J F, et al. Tailoring permittivity using metasurface: a facile way of enhancing extreme-angle transmissions for both TE- and TM-polarizations[J]. *Opt Express*, 2022, **30**(16): 29365–29378.
- [157] Dong D S, Yang J, Cheng Q, et al. Terahertz broadband low-reflection metasurface by controlling phase distributions[J]. *Adv Opt Mater*, 2015, **3**(10): 1405–1410.
- [158] Zheng X Y, Lin J, Wang Z, et al. Manipulating light transmission and absorption via an achromatic reflectionless metasurface[J]. *Photonix*, 2023, **4**(1): 3.
- [159] Ebbesen T W, Lezec H J, Ghaemi H F, et al. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays[J]. *Nature*, 1998, **391**(6668): 667–669.
- [160] Genet C, Ebbesen T W. Light in tiny holes[J]. *Nature*, 2007, **445**(7123): 39–46.
- [161] de Abajo F J G. *Colloquium*: light scattering by particle and hole arrays[J]. *Rev Mod Phys*, 2007, **79**(4): 1267–1290.
- [162] Garcia-Vidal F J, Martin-Moreno L, Ebbesen T W, et al. Light passing through subwavelength apertures[J]. *Rev Mod Phys*, 2010, **82**(1): 729–787.
- [163] Coe J V, Rodriguez K R, Teeters-Kennedy S, et al. Metal films with arrays of tiny holes: spectroscopy with infrared plasmonic scaffolding[J]. *J Phys Chem C*, 2007, **111**(47): 17459–17472.
- [164] Chen Y Z, Zhou C X, Luo X G, et al. Structured lens formed by a 2D square hole array in a metallic film[J]. *Opt Lett*, 2008, **33**(7): 753–755.

- [165] Coe J V, Heer J M, Teeters-Kennedy S, et al. Extraordinary transmission of metal films with arrays of subwavelength holes[J]. *Annu Rev Phys Chem*, 2008, **59**: 179–202.
- [166] Gordon R, Brolo A G, Sinton D, et al. Resonant optical transmission through hole-arrays in metal films: physics and applications[J]. *Laser Photonics Rev*, 2010, **4**(2): 311–335.
- [167] Baida F I, Belkhir A, Arar O, et al. Enhanced optical transmission by light coaxing: mechanism of the TEM-mode excitation[J]. *Micron*, 2010, **41**(7): 742–745.
- [168] Hu C G, Pu M B, Li X, et al. Extraordinary optical transmission induced by electric resonance ring and its dynamic manipulation at far-infrared regime[J]. *Opt Express*, 2011, **19**(19): 18109–18115.
- [169] Zhang X, Liu H T. Progress in extraordinary optical transmission[J]. *Prog Phys*, 2016, **36**(4): 118–127.
张鑫, 刘海涛. 光学异常透射研究进展[J]. *物理学进展*, 2016, **36**(4): 118–127.
- [170] Oh Y, Kim K, Hwang S, et al. Recent advances of nanostructure implemented spectroscopic sensors-A brief overview[J]. *Appl Spectrosc Rev*, 2016, **51**(7-9): 656–668.
- [171] Yang Z H, Song Y, Chen S, et al. Control of EOT of subwavelength metal bullseye structures by coaxial nanocolumns[J]. *Opto-Electron Eng*, 2018, **45**(11): 180207.
杨泽华, 宋阳, 陈爽, 等. 同轴纳米柱对亚波长金属牛眼结构 EOT 的调控[J]. *光电工程*, 2018, **45**(11): 180207.
- [172] Zhang X H, Li X, Jin J J, et al. Polarization-independent broadband meta-holograms via polarization-dependent nanoholes[J]. *Nanoscale*, 2018, **10**(19): 9304–9310.
- [173] Wang Y Q, Ma X L, Li X, et al. Perfect electromagnetic and sound absorption via subwavelength holes array[J]. *Opto-Electron Adv*, 2018, **1**(8): 180013.
- [174] Liu J F, Chen J, Li K K, et al. Broadband cross-slots fractal nano-antenna and its extraordinary optical transmission characteristics[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, **47**(6): 190422.
刘觉夫, 陈娇, 李康康, 等. 宽频十字缝隙分形纳米天线及其异常透射特性[J]. *光电工程*, 2020, **47**(6): 190422.
- [175] Fleischhauer M, Imamoglu A, Marangos J P. Electromagnetically induced transparency: optics in coherent media[J]. *Rev Mod Phys*, 2005, **77**(2): 633–673.
- [176] Xu Q F, Sandhu S, Povinelli M L, et al. Experimental realization of an on-chip all-optical analogue to electromagnetically induced transparency[J]. *Phys Rev Lett*, 2006, **96**(12): 123901.
- [177] Papanikolaou N, Fedotov V A, Zheludev N I, et al. Metamaterial analog of electromagnetically induced transparency[J]. *Phys Rev Lett*, 2008, **101**(25): 253903.
- [178] Yang Y M, Kravchenko I I, Briggs D P, et al. All-dielectric metasurface analogue of electromagnetically induced transparency[J]. *Nat Commun*, 2014, **5**(1): 5753.
- [179] Mørk J, Lunnemann P, Xue W, et al. Slow and fast light in semiconductor waveguides[J]. *Semicond Sci Technol*, 2010, **25**(8): 083002.
- [180] Hadad Y, Sounas D L, Alu A. Space-time gradient metasurfaces[J]. *Phys Rev B*, 2015, **92**(10): 100304.
- [181] Zhang X Q, Xu N N, Qu K N, et al. Electromagnetically induced absorption in a three-resonator metasurface system[J]. *Sci Rep*, 2015, **5**(1): 10737.
- [182] Yahiaoui R, Burrow J A, Mekonen S M, et al. Electromagnetically induced transparency control in terahertz metasurfaces based on bright-bright mode coupling[J]. *Phys Rev B*, 2018, **97**(15): 155403.
- [183] Liu Y C, Li B B, Xiao Y F. Electromagnetically induced transparency in optical microcavities[J]. *Nanophotonics*, 2017, **6**(5): 789–811.
- [184] Ma L J, Slattery O, Tang X. Optical quantum memory based on electromagnetically induced transparency[J]. *J Opt*, 2017, **19**(4): 043001.
- [185] Limonov M F, Rybin M V, Poddubny A N, et al. Fano resonances in photonics[J]. *Nat Photonics*, 2017, **11**(9): 543–554.
- [186] Liu H Z, Guo C, Vampa G, et al. Enhanced high-harmonic generation from an all-dielectric metasurface[J]. *Nat Physics*, 2018, **14**(10): 1006–1010.
- [187] Ma C W, Ma W Y, Tan Y, et al. High Q-factor terahertz metamaterial based on analog of electromagnetically induced transparency and its sensing characteristics[J]. *Opto-Electron Eng*, 2018, **45**(11): 180298.
马长伟, 马文英, 谭毅, 等. 高Q值THz类EIT超材料及传感特性研究[J]. *光电工程*, 2018, **45**(11): 180298.
- [188] Tang Y Z, Ma W Y, Wei Y H, et al. A tunable terahertz metamaterial and its sensing performance[J]. *Opto-Electron Eng*, 2017, **44**(4): 453–457.
唐雨竹, 马文英, 魏耀华, 等. 一种旋转可调的太赫兹超材料及其传感特性[J]. *光电工程*, 2017, **44**(4): 453–457.
- [189] Kim T T, Kim H D, Zhao R K, et al. Electrically tunable slow light using graphene metamaterials[J]. *ACS Photonics*, 2018, **5**(5): 1800–1807.
- [190] You Y, Hu Y Q, Lin G W, et al. Quantum nonreciprocity based on electromagnetically induced transparency in chiral quantum-optical systems[J]. *Phys Rev A*, 2021, **103**(6): 063706.
- [191] Bayrakli I. Electromagnetically induced transparency in natural and artificial molecules[J]. *Opt Laser Technol*, 2021, **141**: 107168.
- [192] Zhang J, Mu N, Liu L H, et al. Highly sensitive detection of malignant glioma cells using metamaterial-inspired THz biosensor based on electromagnetically induced transparency[J]. *Biosens Bioelectron*, 2021, **185**: 113241.
- [193] Liu S, Noor A, Du L L, et al. Anomalous refraction and nondiffractive Bessel-beam generation of terahertz waves through transmission-type coding metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2016, **3**(10): 1968–1977.
- [194] Lavigne G, Caloz C. Generalized Brewster effect using bianisotropic metasurfaces[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(7): 11361–11370.
- [195] Zhang Z, Che Z Y, Liang X Y, et al. Realizing generalized Brewster effect by generalized Kerker effect[J]. *Phys Rev Appl*, 2021, **16**(5): 054017.
- [196] Sun J B, Liu L Y, Dong G Y, et al. An extremely broad band metamaterial absorber based on destructive interference[J]. *Opt Express*, 2011, **19**(22): 21155–21162.
- [197] Liu X L, Tyler T, Starr T, et al. Taming the blackbody with infrared metamaterials as selective thermal emitters[J]. *Phys Rev Lett*, 2011, **107**(4): 045901.
- [198] Tao H, Bingham C M, Pilon D, et al. A dual band terahertz metamaterial absorber[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2010, **43**(22): 225101.
- [199] Xu H X, Wang G M, Qi M Q, et al. Triple-band polarization-insensitive wide-angle ultra-miniature metamaterial transmission line absorber[J]. *Phys Rev B*, 2012, **86**(20): 205104.
- [200] Wu P C, Papanikolaou N, Tsai D P. Self-affine graphene

- metasurfaces for tunable broadband absorption[J]. *Phys Rev Appl*, 2016, **6**(4): 044019.
- [201] Zhou L, Tan Y L, Wang J Y, et al. 3D self-assembly of aluminium nanoparticles for plasmon-enhanced solar desalination[J]. *Nat Photonics*, 2016, **10**(6): 393–398.
- [202] Zhou L, Tan Y L, Ji D X, et al. Self-assembly of highly efficient, broadband plasmonic absorbers for solar steam generation[J]. *Sci Adv*, 2016, **2**(4): e1501227.
- [203] Cui Y X, Fung K H, Xu J, et al. Ultrabroadband light absorption by a sawtooth anisotropic metamaterial slab[J]. *Nano Lett*, 2012, **12**(3): 1443–1447.
- [204] Ye D X, Wang Z Y, Xu K W, et al. Ultrawideband dispersion control of a metamaterial surface for perfectly-matched-layer-like absorption[J]. *Phys Rev Lett*, 2013, **111**(18): 187402.
- [205] Wetzstein G, Ozcan A, Gigan S, et al. Inference in artificial intelligence with deep optics and photonics[J]. *Nature*, 2020, **588**(7836): 39–47.
- [206] Ma W, Liu Z C, Kudyshev Z A, et al. Deep learning for the design of photonic structures[J]. *Nat Photonics*, 2021, **15**(2): 77–90.
- [207] Wiecha P R, Arbouet A, Girard C, et al. Deep learning in nano-photonics: inverse design and beyond[J]. *Photonics Res*, 2021, **9**(5): B182–B200.
- [208] Jia Y T, Qian C, Fan Z X, et al. In situ customized illusion enabled by global metasurface reconstruction[J]. *Adv Funct Mater*, 2022, **32**(19): 2109331.
- [209] An S S, Zheng B W, Julian M, et al. Deep neural network enabled active metasurface embedded design[J]. *Nanophotonics*, 2022, **11**(17): 4149–4158.
- [210] Krasikov S, Tranter A, Bogdanov A, et al. Intelligent metaphotonics empowered by machine learning[J]. *Opto-Electron Adv*, 2022, **5**(3): 210147.
- [211] Jin Y B, He L S, Wen Z H, et al. Intelligent on-demand design of phononic metamaterials[J]. *Nanophotonics*, 2022, **11**(3): 439–460.
- [212] Chen J T, Qian C, Zhang J, et al. Correlating metasurface spectra with a generation-elimination framework[J]. *Nat Commun*, 2023, **14**(1): 4872.
- [213] Guo J J, Zhang Y L, Huang M, et al. Electromagnetically large cylinders with duality symmetry by hybrid neural networks[J]. *Opt Laser Technol*, 2024, **168**: 109935.

作者简介



范辉颖 (1997-), 男, 苏州大学物理学硕士研究生, 研究方向为人工微结构材料中的反常布儒斯特效应研究。在 *Optica*、*Optics and Laser Technology*、*Physical Review Applied* 等期刊发表论文 5 篇。

E-mail: imfanhy@163.com



【通信作者】罗杰 (1989-), 男, 博士, 副教授, 主要从事超构材料、超构表面、光子晶体等人工微结构的物性与应用研究。在 *Physical Review Letters*、*Physical Review X*、*Light: Science & Applications*、*Optica* 等期刊发表论文 70 余篇。

E-mail: luojie@suda.edu.cn

团队介绍

苏州大学江苏省薄膜材料重点实验室 (江苏省重点实验室) 于 1993 年正式获批建设。实验室主要从事薄膜和微纳结构材料的制备、结构和性能的基础性研究, 以及理论研究, 并积极开发它在各方面应用的关键技术和工艺, 是江苏省功能薄膜材料研究及高层次人才培养的基地。

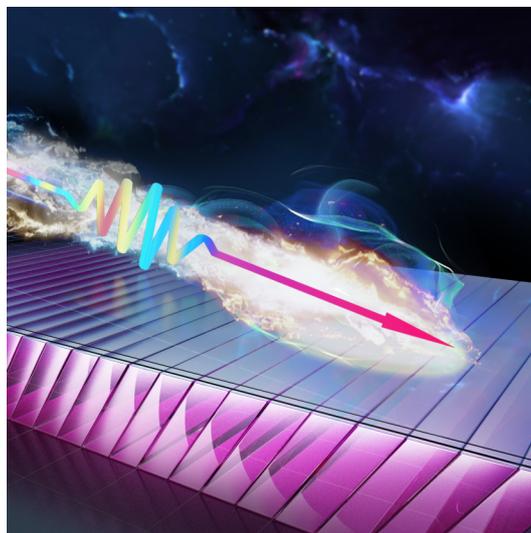
罗杰副教授团队隶属于江苏省薄膜材料重点实验室, 主要从事超构材料、超构表面、光子晶体等人工微结构的物性与应用研究。团队先后获得国家自然科学基金面上项目与青年基金, 江苏省自然科学基金面上项目与青年基金, 江苏省科协青年科技人才托举工程等项目的资助。在 *Physical Review Letters*、*Physical Review X*、*Light: Science & Applications*、*Optica*、*Photonics Research*、*Nanophotonics*、*Physical Review* 系列等国际权威期刊发表论文 70 余篇, 撰写了 2 部英文论著章节, 获美国专利授权 1 项, 中国发明专利授权 15 项。研究成果获江苏省科学技术奖二等奖、江苏省青年光学科技奖、苏州市自然科学优秀学术论文一等奖。



扫描二维码, 获取PDF全文

Research progress of reflectionless electromagnetic metasurfaces

Fan Huiying, Luo Jie*



Schematic of reflectionless electromagnetic metasurfaces

Overview: Electromagnetic devices that manipulate the propagation of electromagnetic waves are ubiquitous in today's society. The high-efficiency control of electromagnetic waves has been a hot topic among researchers in the past few decades. Electromagnetic metasurfaces, as a class of planar electromagnetic materials consisting of single-layer or multilayer subwavelength artificial micro-structures, can precisely control the amplitude, phase, wavefront, dispersion, polarization, and angular momentum of electromagnetic waves in the subwavelength scale. However, the phenomenon of reflection is inevitable in the design and application of metasurfaces. In addition to reflection-based metasurfaces that manipulate electromagnetic waves through reflection, for transmission-based metasurfaces with broad application prospects, their efficiency is mainly limited by losses and reflection. The reflected electromagnetic waves are difficult to be utilized by the system. Therefore, reducing or even eliminating reflection to enhance electromagnetic control efficiency is a key scientific problem in the field of metasurfaces. Designing reflectionless metasurfaces can provide new theories and approaches for achieving high-efficiency electromagnetic devices. The mechanism and design research of reflectionless metasurfaces are one of the important research directions in the field of metasurfaces. This article reviews the theory and applications of reflectionless electromagnetic metasurfaces, elucidating the basic principles of reflectionless metasurfaces from three aspects: Huygens' principle, electromagnetic resonance, and Brewster effect. Specifically, it includes Huygens metasurfaces, multilayer reflectionless metasurfaces, and Brewster metasurfaces. This article also introduces important applications of reflectionless metasurfaces, including anomalous refraction, polarization control, antireflection metasurfaces, and perfect absorption of electromagnetic waves. In addition, this article summarizes and prospects the challenges and development prospects in this field. The future focus will be on reducing reflection to improve the efficiency of metasurfaces, and further exploration of new physical effects and applications is still needed.

Fan H Y, Luo J. Research progress of reflectionless electromagnetic metasurfaces[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(9): 230147; DOI: 10.12086/oe.2023.230147

Foundation item: Project supported by National Natural Science Foundation of China (12374293), and Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20221354).

School of Physical Science and Technology, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

* E-mail: luojie@suda.edu.cn