



电磁超构材料色散调控研究进展

郭迎辉, 蒲明博, 马晓亮, 李 雄, 罗先刚*

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

摘要: 超构材料通常由亚波长的周期性谐振单元组成, 具有自然材料所不具备的超常电磁特性, 为操控电磁波提供了全新的技术途径。色散是材料的固有属性, 调节亚波长结构的电磁共振可以实现奇异的色散特性, 从而突破传统定律限制, 实现对电磁波的任意操控, 由此产生了一系列全新的应用, 如超分辨成像/光刻、高效电磁吸收/辐射、平面光子器件等。本文总结了超构材料中色散调控的基本理论和几种典型方法, 介绍了其在相关领域的应用, 并对超构材料的发展前景作出展望。

关键词: 超构材料; 色散调控; 局域相位调控; 平面光学器件

中图分类号: TB33

文献标志码: A

Advances of dispersion-engineered metamaterials

Yinghui Guo, Mingbo Pu, Xiaoliang Ma, Xiong Li and Xiangang Luo*

State Key Laboratory of Optical Technologies on Nano-Fabrication and Micro-Engineering, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China

Abstract: Metamaterials (MMs) composed of periodic resonant subwavelength structures exhibit exotic electromagnetic properties that do not exist in nature, and open an avenue for electromagnetic waves (EMWs) manipulation. Dispersion is an inherent property of MMs. By engineering the electromagnetic resonances of MMs, extraordinary dispersion can be achieved thereby one can break the traditional physical laws and manipulate the EMWs at will. Subsequently, a serial of applications emerge including super-resolution imaging/lithography, electromagnetic absorber/radiator and planar optical devices. In this review, we summarize several typical approaches, theories and relevant applications of dispersion engineering of MMs.

Keywords: metamaterials; dispersion engineering; local phase modulation; planar optical devices

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.01.001

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, **44**(1): 3–22

1 引言

色散是材料的固有属性。自从洛伦兹建立基于束缚电子谐振的色散模型以来, 光与物质相互作用中的色散问题得到了广泛研究^[1-2]。一般而言, 色散会导致信号畸变和器件的带宽受限。如果能够适当地对色散进行调控, 可使其发挥重要作用。目前, 色散调控已经在很多领域得到应用, 例如在通信领域, 色散调控

可以抑制光纤的非线性效应^[3], 实现密集波分复用以及孤子传输^[4]; 在光学工程领域, 通过色散调控可以构建无色差^[5]的光学透镜或具有超强色散的慢光器件、分光器件或谱分析仪^[6-7]。然而, 自然界材料的色散由基本粒子(分子或原子)的电磁响应决定, 人们很难改变其固有的色散特性。

近年来, 随着微细加工技术的进步和材料科学的发展, 电磁波和物质在亚波长尺度的相互作用引起了广泛关注。超构材料(Metamaterials)由尺度远小于工作波长的电磁共振单元组成, 从宏观上可以等效为均匀

收稿日期: 2016-11-04; 收到修改稿日期: 2016-12-30

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

媒质。通过改变电磁共振单元的结构、尺寸及其排布规律,可以获得和自然界材料类似的,甚至自然界材料所不具备的超常电磁特性,为电磁波调控提供了前所未有的灵活性^[8-10]。

此外,金属微纳结构中表面等离子体激元(SPP)的激发^[11-13],提供了一种在纳米尺度操控光子的有效方法。SPP独特的色散特性使其具有超短波长和局域相位调制特性^[14]。利用SPP的超短波长特性,可以实现超衍射光刻^[15-18]。2015年,基于该原理,在365 nm波长下单次曝光成像光刻分辨率已突破22 nm节点,为传统衍射极限的1/8^[19-20]。利用SPP的局域相位调制特性,可以突破传统折反射定律的限制实现对电磁波的任意操控^[14]。基于该特性,可以构造一系列平面光子器件,降低光学系统的复杂度、提高其集成度,促进集成光学和空间光学的发展^[21-23]。SPP的另一个重要特点就是其色散特性与金属结构密切相关(图1),通过改变金属结构的表面形状,如引入狭缝或谐振结构等可以对SPP的传播特性进行调制。同时,结构化金属膜层中SPP的杂化耦合效应也增加了结构色散的可调谐性。

综上所述,在亚波长尺度下,电磁波与物质相互作用的形式更加丰富也更加复杂。对超构材料色散调控原理和方法的理解,有助于增强对电磁波的调控能力,设计更加符合实际应用需求的光子和电磁器件。

本文将从这一角度出发,对表面等离子体超构材料的色散机制、调控方法和典型应用进行介绍。

2 表面等离子体超构材料的色散及异常电磁特性

2.1 金属膜层中表面等离子体波的色散与超短波长特性

对于如图1(a)所示的半无限大的金属(ϵ_m)—介质(ϵ_d)分界面^[24],根据麦克斯韦方程边界条件,可以推导出横磁(TM)偏振所激发SPP的传播常数为 $\beta = k_0 \sqrt{\epsilon_m \epsilon_d / (\epsilon_m + \epsilon_d)}$,其色散曲线位于光锥线的右侧(图1(b))。相比自由空间中的电磁波,相同频率的SPP波长更短,对应的分辨率更高,为实现超衍射传输和光刻提供了理论依据^[15-16]。特别地,当金属和介质满足介电常数匹配条件($\text{Re}(\epsilon_m) = -\epsilon_d$)时,能够激发宽波矢范围的SPP波并耦合放大倏逝波,恢复散射物体的高频信息,为实现超分辨成像提供了技术途径^[25]。然而,金属介电常数的虚部限制了SPP的最小等效波长。在实际应用中,通常采用具有一定厚度的金属膜层(图1(c))构建超分辨透镜^[15-17, 26]。通过改变金属膜层的厚度,可进一步缩小SPP的等效波长,提高超透镜的分辨率,如图2所示。

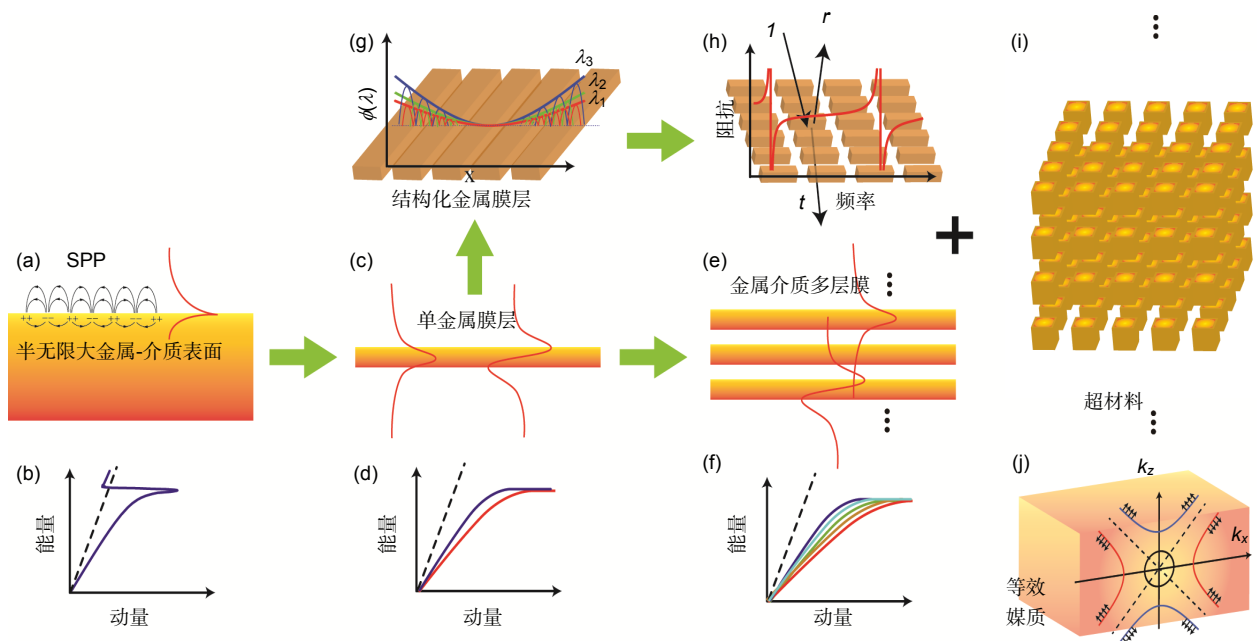
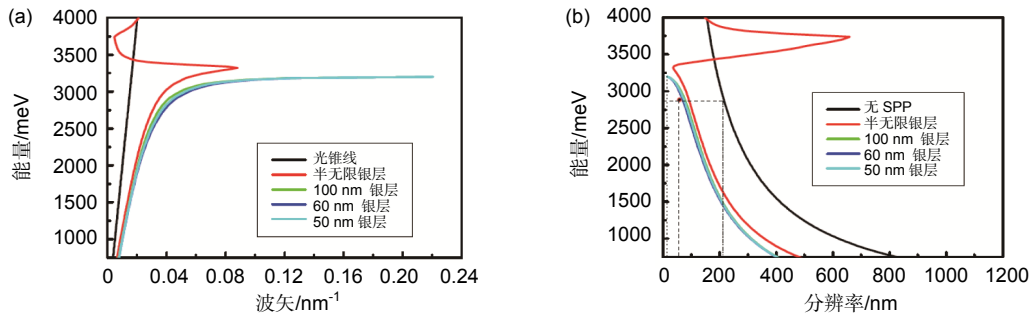
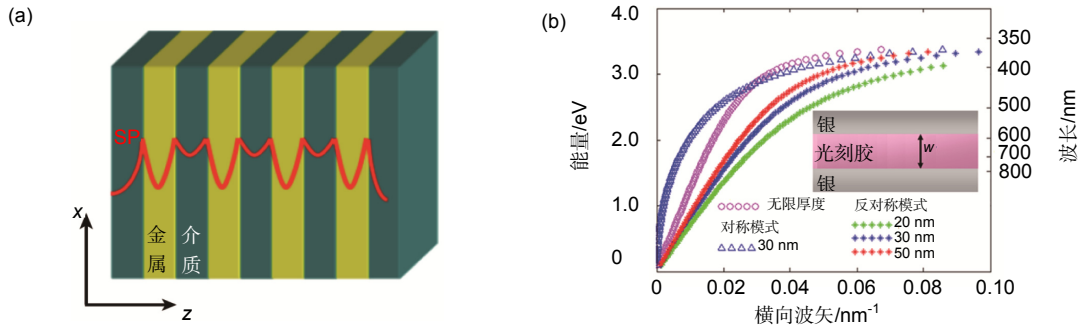


图1 不同类型表面等离子体超构材料的色散.

图2 (a)不同厚度金属的SPP色散及(b)对应的分辨率^[16].图3 (a)金属-介质多层膜中的模式耦合与(b)MIM结构中的色散关系^[29].

2.2 基于金属-介质多层膜的倏逝波定向传输及滤波

单一金属-介质界面或单一金属膜层的介电常数匹配条件限制了超透镜材料和工作频率的选择，而亚波长金属-介质多层膜(图 3(a))则能够克服上述不足^[27-28]。当相邻膜层的厚度小于 SPP 的穿透深度时，SPPs 会相互耦合分裂为多个模式(图 1(f))^[15-16]。如果模式的数量足够多且间距足够小时，同样能够实现宽波矢范围的倏逝波放大，从而实现超分辨成像。以金属-介质-金属(MIM)三层膜为例(图 3(b))，SPPs 的耦合导致产生新的谐振模式：对称模和非对称模^[29]，模式间距可通过改变介质层厚度调节。可见，相比单一金属膜层，金属-介质多层膜结构在色散调控方面具有更多的自由度。

借助等效介质理论，可将金属-介质多层膜结构等效为均匀的各向异性超构材料(图 1(j))，对于自由空间的传播波和第一布里渊区范围内模式，均可忽略光子晶体能带的影响。考虑二维情况，其色散方程可描述为

$$\frac{k_x^2}{\varepsilon_x} + \frac{k_z^2}{\varepsilon_z} = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2, \quad (1)$$

其中等效介电常数 ε_x 和 ε_z 可分别表示为

$$\varepsilon_x = \varepsilon_d \frac{t_d}{t_d + t_m} + \varepsilon_m \frac{t_m}{t_d + t_m}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_z^{-1} = \varepsilon_d^{-1} \frac{t_d}{t_d + t_m} + \varepsilon_m^{-1} \frac{t_m}{t_d + t_m}. \quad (3)$$

显然，调节膜层的介电常数(ε_m , ε_d)和厚度(t_m , t_d)可以使色散曲线的拓扑由(椭)圆型演变为双曲型(图 1(j))。

双曲色散材料的一个重要特性是其能够支持倏逝波的传输。由电磁场理论可知，群速度的方向沿着色散等频线的法线方向^[27]。因此，双曲色散材料中携带高频信息的倏逝波均沿双曲色散渐近线的法线方向传播，即具有超衍射定向传输特性(图 1(j))。由于倏逝波难以观测，其在双曲色散材料中的定向传输直到 2013 年才通过远场成像的方式得到实验验证(图 4(a)~(c))^[30]。最近，利用近场探测方法验证了双曲色散超构表面中同样存在倏逝波的定向传输(图 4(d)~(f))^[31]。利用楔形或圆柱形双曲色散材料中的定向传输及波矢缩放特性可以实现不同放大倍率的超透镜^[32-33]和双曲透镜^[34]。

除定向传输外，双曲色散材料的独特光学特性还表现在空间频谱滤波上^[37-39]。由于倏逝波的近场特性，对金属-介质多层膜滤波特性的表征多是通过严格耦合波分析(RCWA)计算多层膜的光学传递函数(OTF)^[37-38]，一直缺乏有效的远场实验表征手段。2014 年，出现了基于莫尔条纹的远场表征方法(图 5(a)~(c))^[35]。该方案在金属-介质多层膜两侧引入非

对称的两组光栅,激发光栅产生高级次衍射波,经多层膜滤波后与检测光栅差频,得到易于远场观测的长周期莫尔条纹。根据莫尔条纹的周期和对比度随入射角度的变化规律,可以表征多层膜的倏逝波滤波特性。采用类似的结构,能实现可见光的单向传输(图 5(d)~

(f))^[36]。基于多层膜滤波的 BPP 干涉光刻^[39]进一步验证了多层膜的倏逝波滤波特性。光栅激发的多个衍射级次经多层膜滤波后仅保留了特定衍射级次的倏逝波,因此干涉条纹的均匀性得到明显改善,可大幅提高干涉光刻图形质量^[39]。

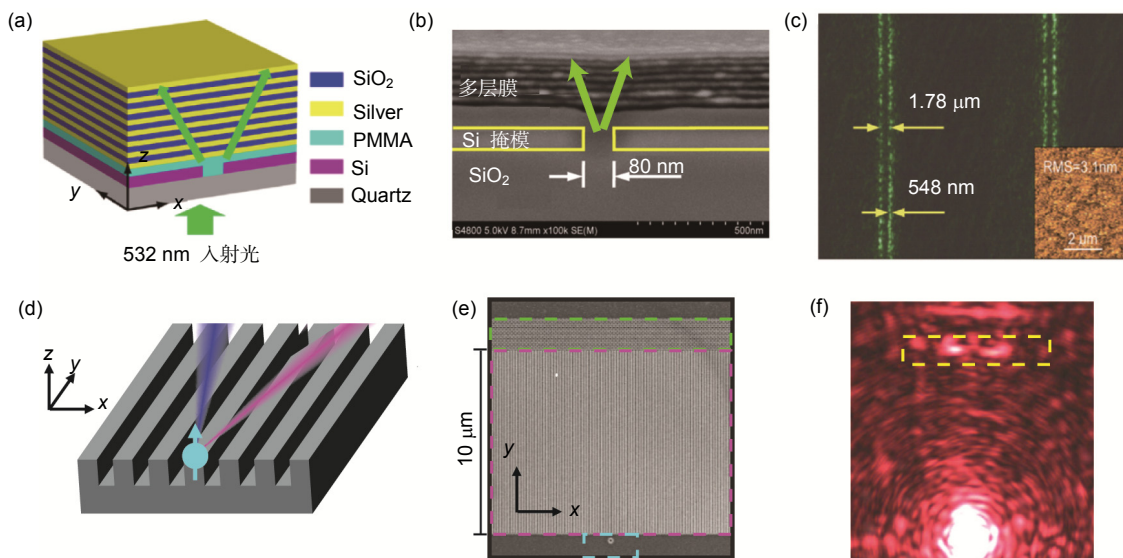


图 4 双曲色散超构材料与超构表面中的超衍射定向传输^[30-31]。(a)~(c)为双曲色散超构材料超衍射定向传输的结构示意图(a),样品图(b)和远场成像结果(c)。(d)~(f)为双曲超构表面超衍射定向传输的结构示意图(d),样品图(e)和近场成像结果(f)。

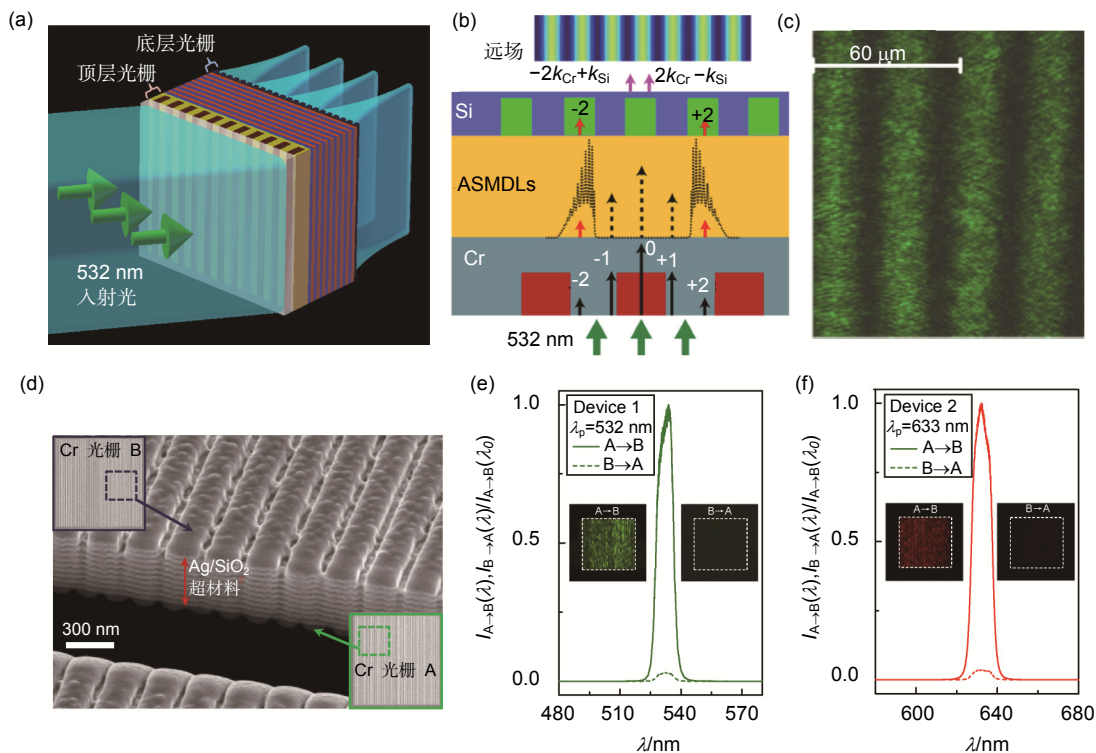


图 5 金属-介质多层膜的倏逝波滤波特性的实验表征及应用。(a)~(c)基于莫尔干涉条纹的实验表征^[35]。(d)~(f)基于金属-介质多层膜倏逝波滤波的可见光单向传输^[36]。

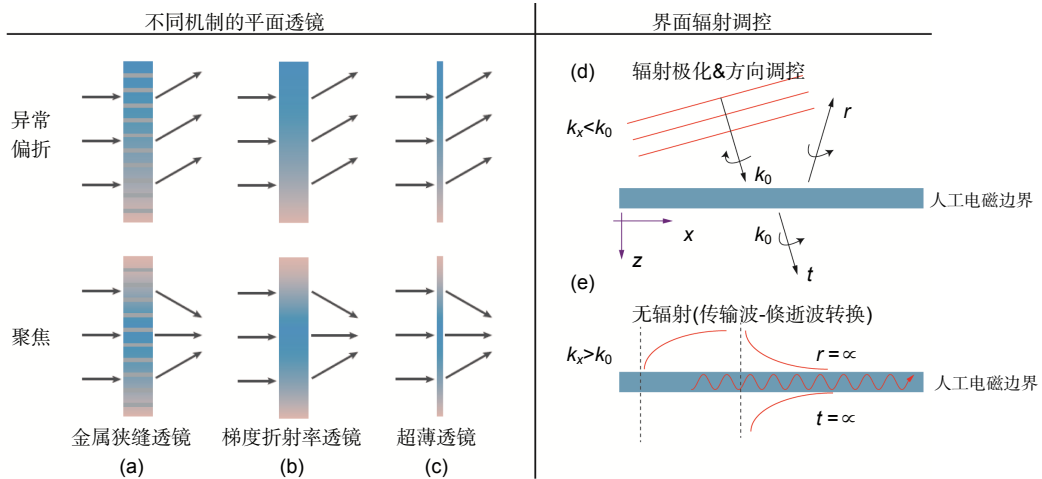


图 6 不同机制的平面透镜及界面辐射调控^[14, 44]. (a) 基于变宽度金属狭缝的平面透镜. (b) 基于梯度折射率的平面透镜. (c) 基于梯度相位的超薄平面透镜. (d) 基于人工电磁边界的辐射偏振和方向调控. (e) 基于人工电磁边界的传输波—倏逝波转换.

2.3 结构化金属膜层的局域相位调制

在金属膜层上引入纳米尺度的金属狭缝同样可以实现对 SPP 的色散调控。从某种意义上讲，金属狭缝可以看作是一种特殊的 MIM 波导。通常，金属狭缝的宽度足够小，MIM 结构仅支持单个模式的传输，其传播常数满足如下色散关系^[13, 40-41]：

$$\tanh(\sqrt{\beta^2 - \varepsilon_d k_0^2} w / 2) = -\frac{\varepsilon_d \sqrt{\beta^2 - \varepsilon_m k_0^2}}{\varepsilon_m \sqrt{\beta^2 - \varepsilon_d k_0^2}}, \quad (4)$$

因此，可以利用缝隙宽度 w 来调制狭缝中表面等离子体的传播常数 β ，进而实现局域相位调控， $\Phi = \text{Re}(\beta d)$ ， d 为狭缝深度^[14, 42]。将一系列宽度不同的狭缝排列在一起(图 1(g))形成特定的相位梯度 $\nabla \Phi$ ，可以改写传统的斯涅耳定律^[14]：

$$\begin{cases} n_i k_0 \sin \theta_i + \nabla \Phi = n_t k_0 \sin \theta_t \\ n_i k_0 \sin \theta_i + \nabla \Phi = n_t k_0 \sin \theta_t \end{cases}. \quad (5)$$

利用梯度相位的概念，可以构建一系列超薄的平面功能器件，实现对电磁波的任意调控。值得指出的是，2011 年哈佛大学 Capasso 教授提出的理论与该方法类似^[43]，如图 6(a)~6(c)所示^[44]。

当结构化金属膜层的厚度远小于入射电磁波的波长时，等效介电常数不具有三维尺度的严格物理含义，此时可将其看作人工电磁边界而非人工电磁介质，这里采用等效面阻抗(Z_{eff})或导纳($Y_{\text{eff}} = 1/Z_{\text{eff}}$)表征其宏观电磁特性(图 1(h))^[45]。结构的复反射与透射系数与界面的阻抗(导纳)密切相关^[14]：

$$r = \frac{-Y_{\text{eff}}}{2Y_0 + Y_{\text{eff}}}, \quad t = \frac{2Y_0}{2Y_0 + Y_{\text{eff}}}, \quad (6)$$

其中 $Y_0 = 1/377 \text{ S}$ 为真空中的导纳。对于各向异性人工电磁边界，可用沿主轴方向的等效导纳 $Y_{\text{eff}, x(y)}$ 代替式 (6) 中的 Y_{eff} ，从而获得正交方向上的复反射和透射系数。因此，调节人工电磁边界的色散特性(Z_{eff} 或 Y_{eff})，可以对电磁辐射的方向、偏振和强度进行控制(图 6(d))。特别地，当辐射波的横向波矢满足 $k_x > k_0$ 时，将实现传输波与表面波之间的转换^[14](图 6(e))。

超构表面的电磁响应特性主要取决于材料结构表面的电流和电磁场分布，利用等效电路理论可直观地对超构表面的色散调控机理进行分析。如图 7 所示，不同结构形式的等效电路和等效阻抗各不相同。

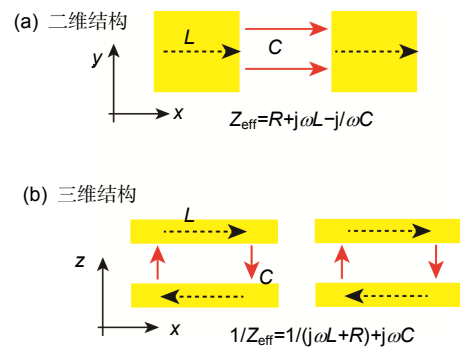


图 7 金属结构的等效电路模型。

其中，电阻来源于结构的损耗，感抗主要由结构形式决定，并且存在如下规律：金属结构越细长等效电感 L 越大；金属间距越小，宽度越大，则等效电容 C 越大。人工电磁边界的色散特性可通过金属的结构形式及结构参数调节。在微波和太赫兹波段等低频波段，金属结构的损耗很小，可以看作理想导体，此时

Z_{eff} 为纯虚数。因此,通过对阻抗的色散特性进行调控可改变透射光和反射光的相位以及偏振态^[46-47],从而改写传统的菲涅尔公式和布儒斯特角计算公式^[14]。当光波段金属结构的损耗较大, Z_{eff} 为复数,通过色散调控逼近理想吸波材料的色散特性可以实现大角度、宽带电磁吸收等功能^[45, 48-49]。

理论研究表明,任何满足因果律的色散都可以通过若干个洛伦兹色散的叠加无限逼近^[51]。以三个洛伦兹色散的叠加为例:

$$\chi(\omega) = 1 - \frac{\omega_{1p}^2}{(\omega^2 - \omega_1^2 + i\omega\gamma_1)} - \frac{\omega_{2p}^2}{(\omega^2 - \omega_2^2 + i\omega\gamma_2)} - \frac{\omega_{3p}^2}{(\omega^2 - \omega_3^2 + i\omega\gamma_3)}, \quad (7)$$

其中: ω_i , ω_{ip} 和 γ_i 代表第 i 个洛伦兹色散的共振频率、等离子频率和碰撞频率。对于图 7(a) 所示的 LC 等效电路,通过与洛伦兹色散模型的对比,可以得到如下关系: $\omega_{ip} = (\varepsilon_0 L t)^{-1/2}$, $\omega_i = (LC)^{-1/2}$, $\gamma = R/L$, 其中 t 为金属结构的厚度, ε_0 为真空中的介电常数。通过调节上述变量,可以实现几乎任意类型的色散(图 8(a) (b))^[50]。由于 LC 谐振电路呈现典型的洛伦兹色散,超构材料可利用金属开口谐振环结构激发多个 LC 谐振实现色散调控^[47],如图 8(c) (d) 所示。除此之外,还可通过在亚波长金属结构中引入深亚波长结构对原结构的电磁响应产生扰动,实现进一步的色散调控^[52]。

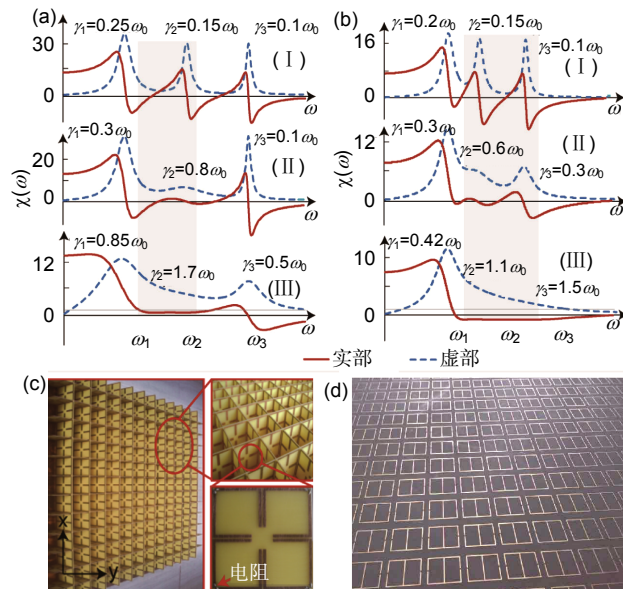


图 8 洛伦兹色散调控^[47, 50]。(a) 色散调控实现近零正值的平坦色散。(b) 色散调控实现近零负值的平坦色散。(c) 立体的开口谐振环组合结构。(d) 平面的开口谐振环结构。

3 表面等离子体超构材料色散调控技术的应用

3.1 表面等离子体超分辨光刻

SPP 的独特色散特性使其具有短波长特性,从而降低光刻系统对光源的要求并提高光刻分辨力,在超分辨光刻领域获得广泛应用。2003~2004 年,利用 g 线汞灯光源(波长 436 nm)和光栅结构激发 SPP,在金属薄膜上下两侧观测到 SPP 干涉条纹和成像效应,得到了 30 nm 特征尺寸曝光点、线结构,并实现 50 nm 线宽(约 1/9 波长)的光刻图形^[15, 53, 54](图 9(a) (b))。2005 年,利用 35 nm 厚的银膜,在 365 nm 波长实现了半周期 60 nm、图形深度约 7 nm 的密集线条以及特征线宽为 89 nm 字符的光刻结果^[17](图 9(c) (d))。

早期 SP 成像光刻曝光深度有限,且线宽有明显的展宽效应。反射式成像光刻则以 SP 反射共振方式放大倏逝波,有效提高了成像焦深、对比度和保真度。2013 年,利用反射式银膜超透镜在 365 nm 波长获得了~50 nm 特征尺寸、40 nm 曝光深度的“OPEN”字符成像光刻图形(图 9(e) (f)),以及 32 nm 线宽密集线条光刻图形^[55]。目前,反射式成像光刻技术已经被用于二维超构表面器件的加工^[56]。

最近,出现了基于 MIM 谐振腔结构的 SP 成像光刻方案^[19, 29]。2015 年,采用 i 线汞灯光源首次实现了单次曝光下 22 nm 线宽的光刻结果(图 9(g) (h))^[19-20]。在 MIM 结构成像光刻的基础上利用离轴照明技术,可以将成像光刻的空气间距拓展到 100 nm 以上,是传统近场成像光刻工作距离的 4~6 倍^[57]。

利用圆柱形金属-介电多层膜的双曲色散特性和波矢缩放特性,可以构建双曲透镜实现放大(图 10(a) (b))和缩小成像^[38, 58]。若将光刻胶置于缩小成像的像面,可实现超分辨缩小成像光刻^[59]。近期实验在 365 nm 波长下获得了线宽为 56 nm(缩小倍率~1.78),中心间距为 135 nm(缩小倍率~1.85)的成像光刻结果(图 10(c)~(e))^[60]。采用类似的方法,在 405 nm 波长获得特征尺寸为 170 nm 的缩小成像光刻结果(图 10(f) (g))^[61]。

早在 2006 年,SP 光刻就被认为可替代传统复杂且昂贵的光刻技术^[12]。目前,该技术已经突破大面积、高分辨力(小于 16 nm)等瓶颈问题,并研制出了相应的光刻机(图 11),在未来有望成为超构材料加工的重要手段。

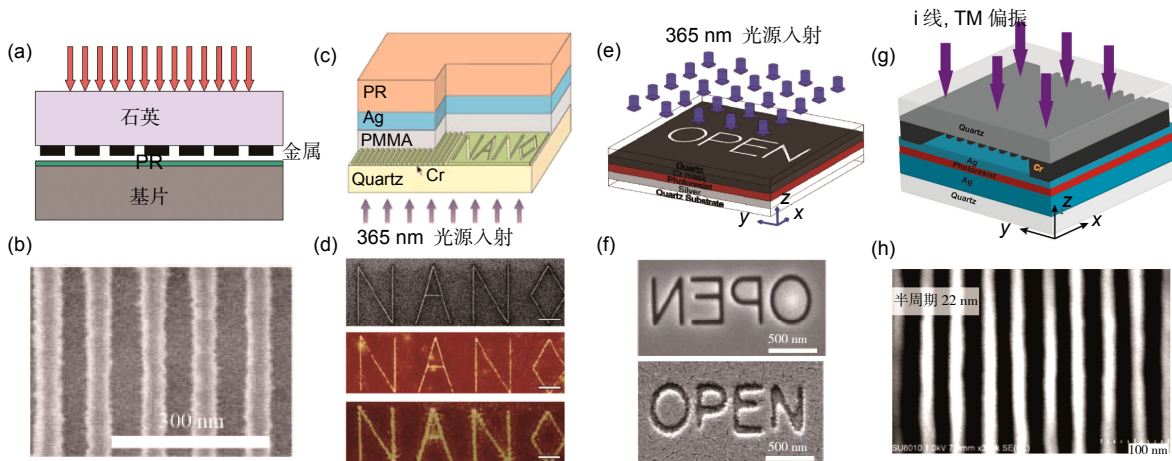


图9 超分辨成像光刻。(a),(b)2004年方案和结果^[15]。(c),(d)2005年方案和结果^[17]。(e),(f)反射式成像光刻方案和结果^[55]。(g),(h)基于MIM谐振腔成像光刻实现22 nm特征尺寸的光刻的方案和结果^[20]。

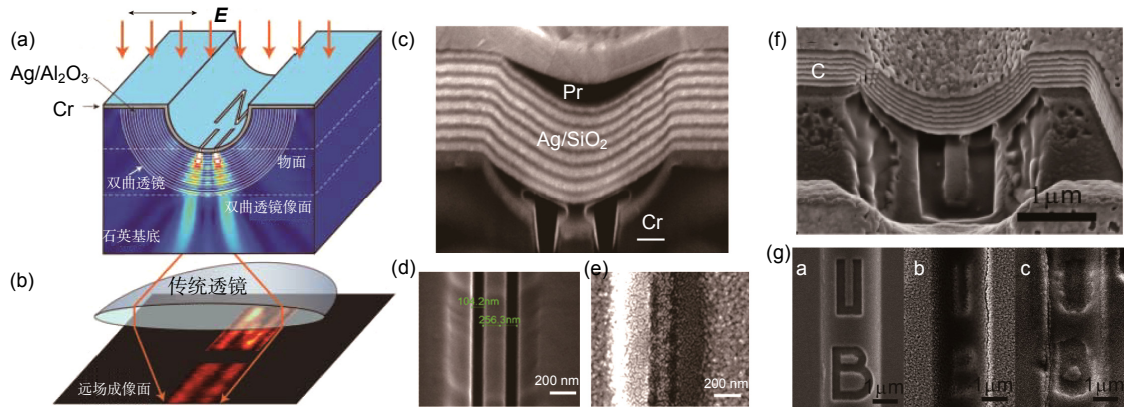


图10 基于Hyperlens的放大成像与缩小成像光刻。(a),(b)柱面双曲透镜放大成像的实验验证^[58],光波长为365 nm,分辨率为130 nm。(c)~(e)柱面双曲透镜缩小成像光刻的实验验证^[60],光波长为365 nm,分辨率为56 nm。(f),(g)柱面双曲透镜缩小成像光刻的另一实验验证^[61],光波长为405 nm,分辨率为170 nm。



图11 SP光刻机。

3.2 电磁隐身

传统电磁隐身的主要手段包括外形设计和电磁吸收。外形设计需要牺牲飞行器的机动性能,而传统电磁吸波材料存在带宽窄、不能自由设计等缺点。超构材料的奇异色散特性为电磁隐身提供了新的设计思路。

2006年,Pendry^[62]和Leonhardt^[63]分别提出了电磁空间的变换理论。Pendry预测结合变换光学和超构材料,可实现“电磁隐身斗篷”等,并随即与Smith等合作在微波段完成实验验证^[64]。此后,关于变换光学和隐身衣的理论迅速发展,研究频段从微波提升到光波;在声波、水波、地震波方面也出现相关研究。然而,变换光学器件的工作带宽受限于材料的色散和被隐身物体的大小^[65]。2008年,Pendry提出“准保角”变换的方案^[66],可在一定程度上拓展工作带宽。此后,相继报道了一批基于变换光学的电磁功能器件,包括地毯式隐身衣^[67-69],龙伯透镜等^[70-72]。变换光学不仅为设计隐身衣等新型电磁器件奠定了理论基础,也为广义相对论的研究提供了简易的平台。2009年,出现了一种由折射率渐变超构材料构成的等效“人工黑洞”理论,并被实验验证^[73-74]。类似地,利用微球引导光线传播,可模拟宇宙中的引力透镜效应^[75]。

除了基于变换光学的隐身技术,还有另一种基于超构材料异常散射的新型电磁隐身方案——虚拟赋形技术^[76-77]。通过设计空间非均匀的亚波长结构,对入射雷达波施加梯度相位,可将电磁波反射到非威胁方向,从而缩减雷达散射截面(RCS)。虚拟赋形技术不需要电磁吸收,基材的选择范围大幅拓展,可以方便地实现红外、微波多波段兼容,以及在极端环境下的隐身。由于无需改变目标的实体外形,该技术有望用于现有装备的升级换代。基于传统超构表面的虚拟赋形工作带宽较窄(图12(a)(b))^[77],随着自旋—轨道相互作用被引入到超构表面设计中^[78],虚拟赋形的工作带宽得以显著拓展(图12(c)(d))^[76,79]。对于TE波和TM波正入射情况,实现了600~2800 nm波长范围内正向RCS缩减10 dB以上。值得注意的是,基于虚拟赋形的RCS

缩减方案在连续型及更加复杂的超构表面结构中也得到验证^[80]。

3.3 电磁辐射调控

超构材料色散调控不仅为电磁隐身提供了新的设计思路,同样在电磁辐射调控中扮演重要角色。例如,传统降低喇叭天线副瓣的手段包括在内部加入介质芯,或者在天线的金属壁上制作褶皱结构。然而,前者会增加天线的重量,同时会降低辐射效率;后者会增加天线制作成本,且会降低工作带宽。最近,将色散调制的超构材料加载在喇叭天线的内壁上实现了宽带的低副瓣辐射^[81]。针对不同形式的天线,色散调控的目标也不相同。对于角锥喇叭天线,当横电波(TE)和横磁波(TM)的阻抗满足 $Z^{TE}Z^{TM} = Z_0^2$ 时(图13(a)(b)),则该喇叭天线支持平衡的混合模式传输,可产

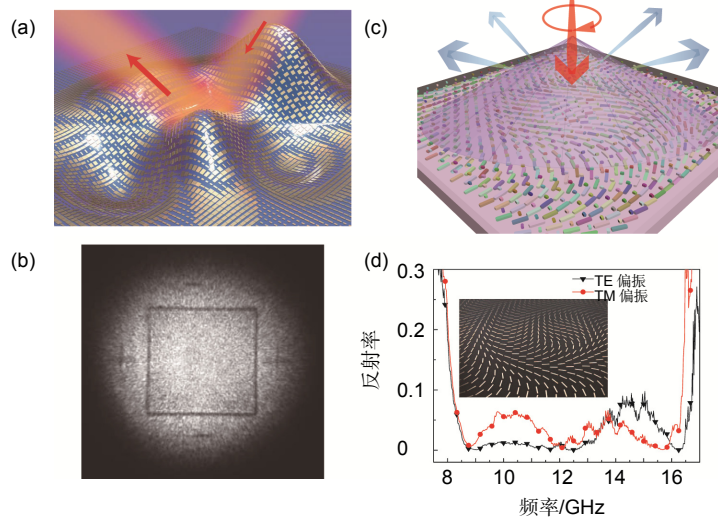


图12 虚拟赋形电磁隐身技术。(a),(b) 730 nm 波长处的虚拟赋形^[77]。(c),(d) 超宽带电磁虚拟赋形^[76]。

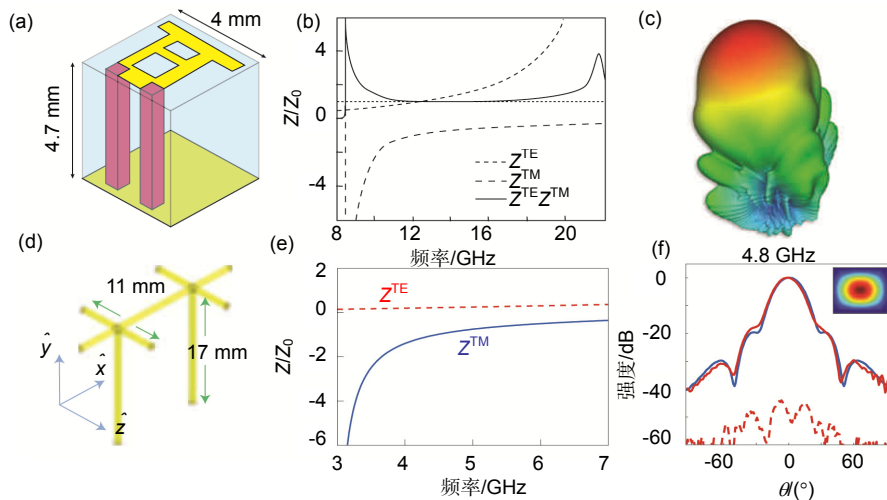


图13 超构材料降低宽频带低副瓣天线^[81]。(a)~(c) 角锥喇叭天线中的超构材料单元结构、色散曲线及远场辐射图; (d)~(e) 矩形喇叭天线中的超构材料单元结构、色散曲线及远场辐射图

生对称的方向图(图 13(c))。对于矩形喇叭天线,当满足 $|Z^{TM}| \gg |Z^{TE}|$ 时(图 13(d) (e)),则辐射场仅包含 TM 波的低副瓣辐射(图 13(f))。

在提高天线辐射的方向性方面,将多层周期性的金属网格加载在喇叭天线上,并对其进行色散调控使其等效折射率接近零,能够提高天线辐射的方向性^[82]。此外,将人工磁导体(AMC)作为天线接地板的反射面,与部分反射表面(PRS)形成特殊的 F-P 谐振腔,不仅可以降低天线的剖面还可以增强其辐射的方向性。

在实现波束扫描方面,传统依靠机械转动的扫描方式系统庞大,扫描速度慢,维护成本高。基于 T/R 组件的相控阵技术具有响应速度快、波束形状任意可控等特性,但是 T/R 组件的成本较高。将亚波长金属断线结构及变容二极管埋置于介质材料中,在满足阻抗匹配的条件下通过调节外加偏置电压,可以构建高透射率的电控龙伯透镜,实现 360°的波束扫描^[83]。最近,出现了基于 LC 谐振的超薄相位调制,通过引入有源器件实现了两个偏振态 $\pm 60^\circ$ 的波束扫描^[14]。

近年来,天线的概念逐渐由微波波段扩展到太赫兹波段甚至光波段,出现了光天线的概念,可以实现对光波辐射特性的调控^[84-86]。2002 年,Lezec 与 Ebbesen 等报道了基于周期性沟槽结构的 SPP 聚束效应(图 14(a) (b))^[87]。理论研究表明,聚束效应与金属狭缝与沟槽中的 SPP 色散特性密切相关^[88],并可以实现单个、多个角度的定向辐射^[89-90]和宽角度均匀辐射^[91]。随后,

该结构被用于增强半导体激光器^[92-93]、量子级联激光器^[94]、荧光分子^[95-96]以及热辐射的辐射方向性。最近,该结构还被用来实现涡旋光束的产生^[97]以及近场准直^[98]。2004 年,准 SPP 概念的提出^[99],使得周期性沟槽结构在电磁辐射调控中的应用范围从光波段拓展到低频段。例如,通过在狭缝天线两侧加载沟槽(图 14(c) (d))实现高方向性辐射^[99-101]。

3.4 平面光学器件

平面光学器件对实现光子集成至关重要。2005 年出现了一种基于表面等离子体色散效应的新型平面光学器件^[42]。利用金属薄膜中的 SPP 模式随狭缝宽度的变化规律,在单层薄膜上可以实现 $0 \sim 2\pi$ 范围内任意梯度的相位变化。与传统器件相比,由于 SPP 的等效波长短,整个器件厚度远小于波长,折射和反射方向可在整个空间内任意调节,突破了传统斯涅耳定律的限制,为平面光学器件的发展开辟了新的技术途径^[14]。在此基础上出现了一系列平面纳光子器件,包括偏折器^[102-103]、聚焦/成像元件^[104-106]、SPP 单向激发器^[107]以及涡旋光束产生器^[41, 108]等(图 15(a)~(c))。2008 年,斯坦福大学实验验证了一维金属纳米狭缝的聚焦特性(图 15(d))^[105]。金属小孔中偏振无关的 SPP 局域相位调制能力可用于二维聚焦和涡旋光束的产生^[106, 108]。利用材料色散与结构色散的相互补偿可以实现近红外波段的无色散偏折与聚焦器件^[103]。基于传播相移的局域相位调制还可以通过具有高折射率的介质材料(如硅)来

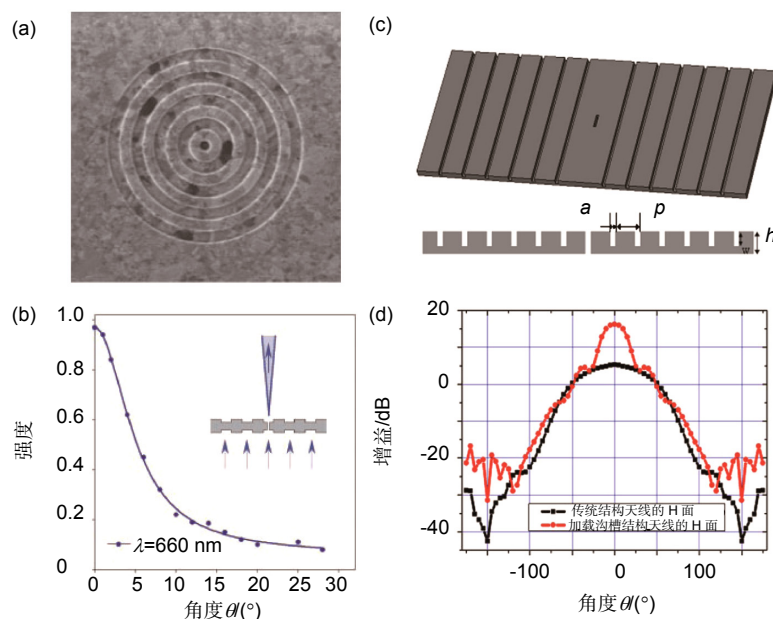


图 14 超构材料实现高方向性辐射。(a),(b) 基于周期性沟槽的聚束效应^[87]。(c),(d) 沟槽结构在增强天线辐射方向性上的应用^[101]。

实现(图 15(e))^[109-110]。

近年来还出现了其它类型的梯度相位超构表面,其局域相位调控机制分别为 LC 谐振^[43, 111]和几何相位^[79, 112]。2011 年,哈佛大学 Capasso 等人利用 V 形金属天线的 LC 谐振来构建梯度相位表面,实现了红外波

段异常反射和偏折,并正式提出“广义折反射定律”的概念^[43]。随后,通过尺度缩放实现了近红外波段^[113]和可见光^[114-115]的偏折和聚焦(图 16)。基于 C 形天线组成的超构表面在太赫兹波段实现了类似的偏折和聚焦效果^[116-118]。

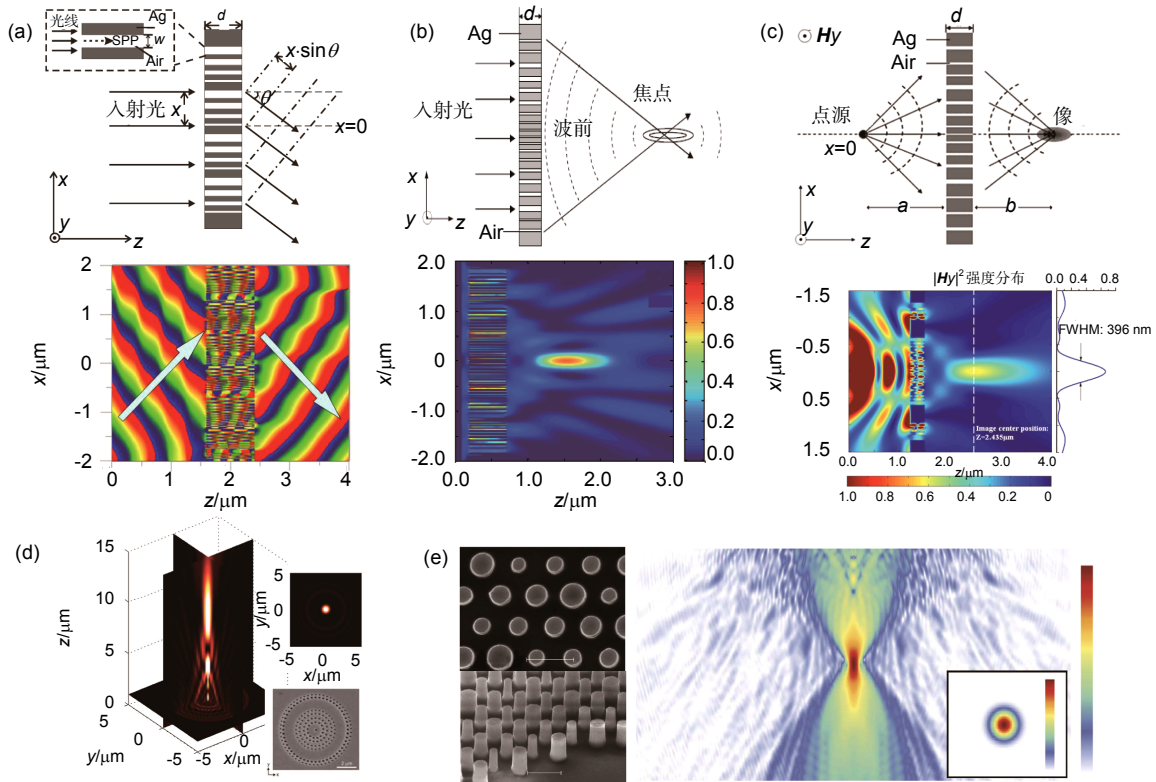


图 15 基于传播相位延迟的平面光学器件. 基于金属狭缝的平面光学器件: 偏折器件(a)^[102]、聚焦器件(b)^[42]和成像器件(c)^[104]. (d) 基于金属圆孔的平面聚焦器件^[106]. (e) 基于高折射率介质的平面聚焦器件^[110].

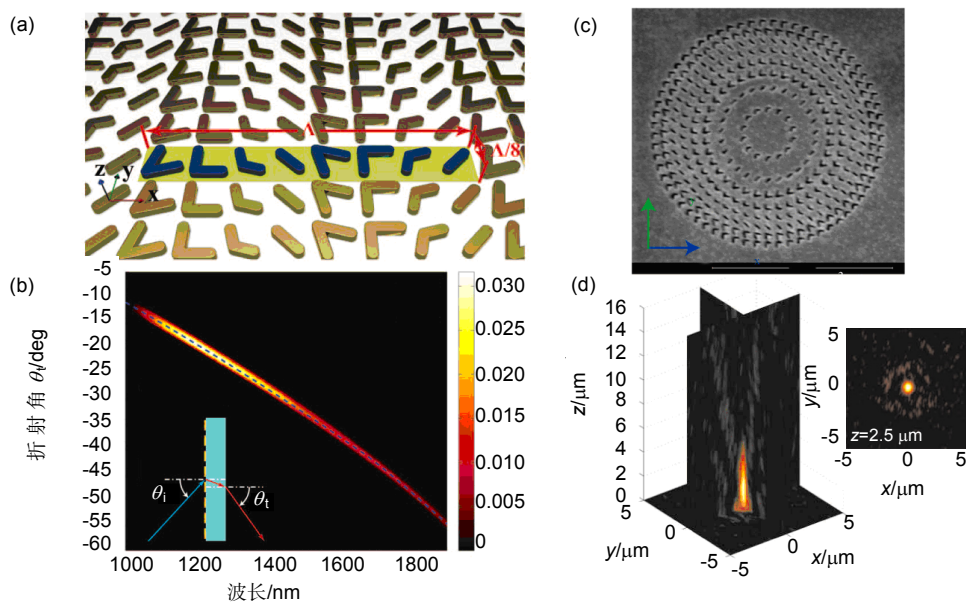


图 16 基于金属天线 LC 谐振的平面光学器件. (a) 基于 V 形天线的偏振器件及(b)实验结果^[113]. (c) 基于 V 形天线互补结构的聚焦器件及(d)实验结果^[114].

同样基于 LC 谐振的局域相位调控机制, 2012 年, 复旦大学周磊教授利用梯度超构表面将传播电磁波转化为结构上的表面波^[111]。同年, 国立台湾大学蔡定平课题组利用反射式的梯度超构表面实现了 750~900 nm 的高效波束偏折^[119]。2014 年, 空军工程大学的屈绍波教授和西安交大的徐卓教授利用超构表面的异常偏折特性和两波转换机制实现了微波段 RCS 的缩减^[120]。类比传统数字电路中用二进制“1”、“0”的不同编码代表量化电平的高低, Engheta 等提出了“数字超构材料”的概念^[121], 并从理论上指出了平面透镜、近零介电常数材料、超透镜等功能器件的“数字化”实现方式。东南大学崔铁军课题组进行了相关实验验证^[122-123]。

基于 LC 谐振的局域相位调控机制, 在保证一定散射强度的条件下, 通常仅能实现 $0\sim\pi$ 范围的相位变化, 需要结合几何相位调制机制^[43]或引入反射面^[111]

才能实现 $0\sim 2\pi$ 范围的相位调制。此外, 几何相位超构表面通常由空间朝向变化的各向异性亚波长结构实现, 其受到目前加工手段的限制, 相元尺寸很难进一步缩小, 相位调制精度有限, 导致波前调制效率较低^[41]。为了解决离散型结构带宽受限和相位不连续的问题, 近来提出了悬链线光学^[14], 通过色散调控可实现宽带连续的几何相位调控。目前悬链线及其变形结构已经被广泛用于一系列复杂光束(涡旋光束^[79]、高阶贝塞尔光束^[79, 124]、Airy 光束)的产生(图 17)以及光自旋霍尔效应(图 18)^[125], 被认为可用于构建超薄、轻量化的光学器件, 有望成为下一代集成光子学的核心技术之一^[126-127]。

对于仅依赖于几何相位调控的透射型超薄金属平面器件, 其有效能量利用率的理论极限为 25%^[128]。这一理论极限在很大程度上限制了该类器件的广泛应用。研究表明, 上述理论极限仅对普通照明模式有效,

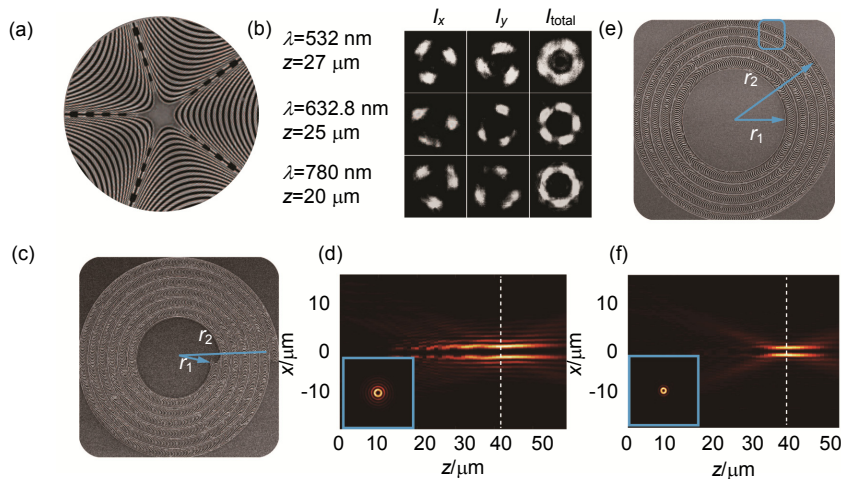


图 17 悬链线光学器件^[79]. (a),(b)涡旋光束产生. (c),(d)贝塞尔光束产生. (e),(f)聚焦涡旋光束产生.

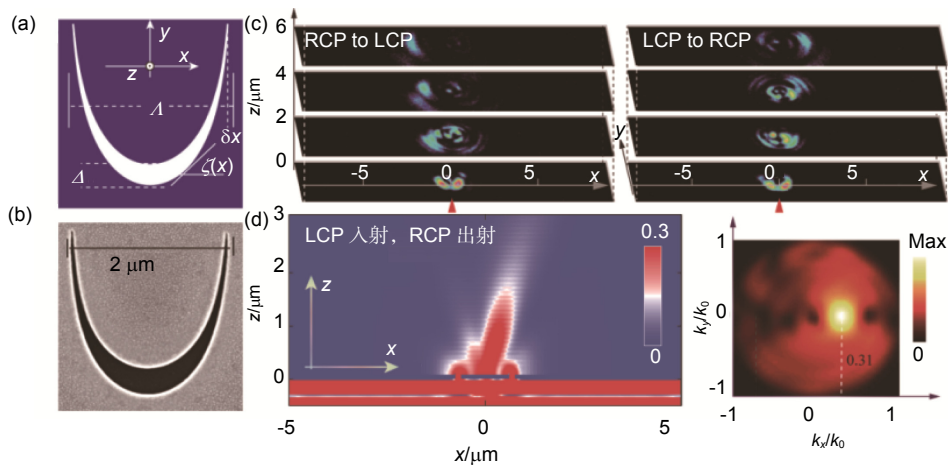


图 18 基于单个悬链线结构的异常偏折及自旋霍尔效应. (a) 结构示意图. (b) 样品电镜图. (c) 实验测得的自旋霍尔效应. (d) 近场(左图)与远场(右图)的异常偏折结果^[125].

如果将相干调控模式引入该类器件,其能量利用率可以大幅提高^[124]。

利用微纳结构的局域相位调控能力,最近研制了一种薄膜成像系统,为大口径、轻量化空间天文望远镜提供了新的实现途径,如图 19(a)所示^[14]。系统中平面衍射透镜的厚度仅为 0.5 mm,具有轻量化、平面化、柔性和可折叠等优点。目前,已经实现了整体尺寸为米级、特征尺寸为百纳米量级的大口径薄膜成像器件加工。

薄膜工艺还可用于构建其他功能器件。图 19 (b)所示为基于该工艺制作的图形区面积为 320 mm × 320 mm,最小特征尺寸为 12 μm 的薄膜吸波材料。实验测得正入射条件下吸波材料反射率为 1~2 GHz 范围内均值为-6.7 dB, 2~4 GHz 范围内均值为-14.1 dB, 4~18 GHz 范围内反射均值为-23.8 dB。

3.5 电磁吸收和偏振调控

在电磁吸收和偏振调控方面,通常采用由亚波长结构材料构成的人工反射镜同时激发电谐振和磁谐振,实现对电磁波的高效调控。由于人工反射镜可突破传统镜面反射的限制,可称之为“超构反射镜(Meta-mirror)”。

2008 年,提出了基于独立电磁调控实现阻抗匹

配,构建超薄的高效超构材料吸收器的方案(图 20(a))^[129]。受限于磁谐振的强色散特性,基于超构反射镜的吸波材料的相对带宽通常不足 3%。拓宽吸收器工作带宽最直接的办法是将多个不同工作频率的单元组合成复合单元结构,增大超构材料的频率响应范围。按照上述设计思想,通过在水平方向或在厚度方向级联多个不同谐振频率的单元结构,实现了多频点^[130]

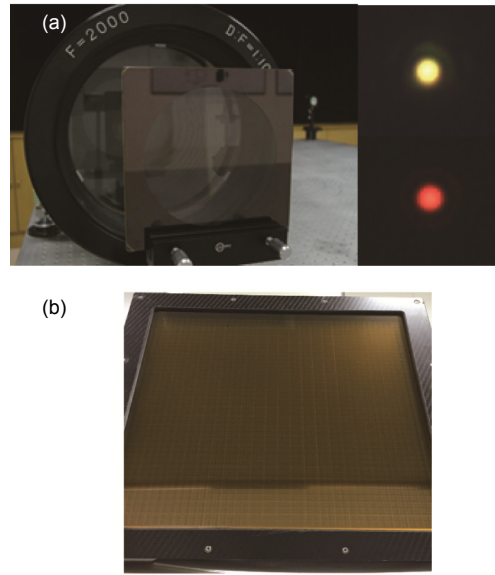


图 19 大口径薄膜器件。(a) 成像器件与成像结果。(b) 吸波材料。

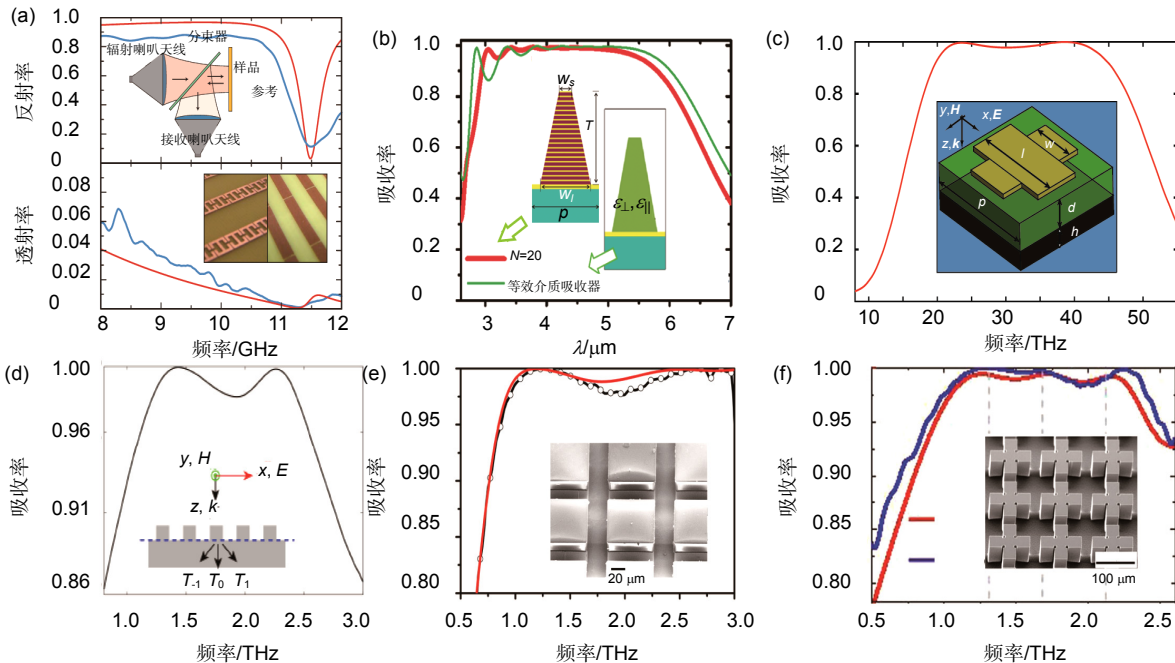


图 20 基于超构材料的电磁吸收。(a) 窄带超材料吸收器^[129]。(b) 基于多层级联的宽带电磁吸收器^[139]。(c) 基于色散调控亚波长金属结构的宽带电磁吸收器^[48]。(d) 基于色散调控亚波长掺杂硅的宽带电磁吸收器的理论模型^[49]。(e), (f) 实验验证^[140-141]。

的吸收和工作带宽 2~3 倍的拓展^[131-134]。

基于超材料的高效电磁吸收在光伏和热辐射等领域具有广泛的应用前景^[135-136],但目前的工作带宽远不能满足应用需求。进一步拓展吸收带宽需要级联更多的单元结构^[137]。何赛灵等人利用 20 层渐变的金属-介质膜层结构将微波段吸波材料的相对吸收带宽拓展至 50%以上^[138]。同年,在红外波段实现了类似的效果(图 20(b))^[139]。然而,这种方案的作用效果有限,且以增加结构的厚度和复杂度为代价,对加工提出了很高的挑战。

实际上,对于一定厚度的超构反射镜而言,吸波材料的工作带宽确实存在着理论极限,即 Rozanov 极限^[76, 142]。如何逼近这一理论极限,是超材料设计中一个需要解决的关键问题。近年来的研究表明通过对亚波长结构的频率色散特性进行精细调控,可以逼近这一极限^[45, 47-49, 143]。基于完美阻抗匹配层的概念,可以建立基于超构反射镜的色散调控数理模型(图 21(a))^[45]。

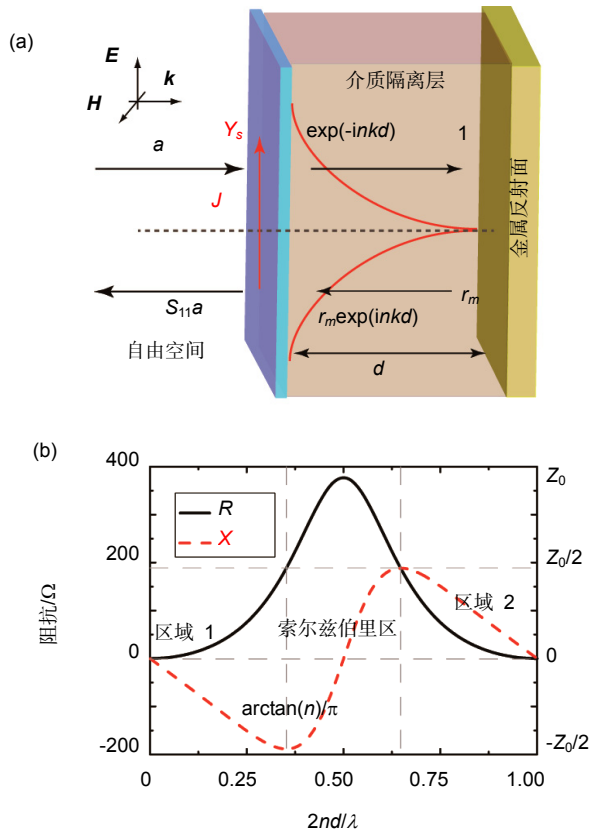


图 21 (a) 超构反射镜色散调控的数理模型, (b) 完美吸收对应的理想阻抗。

$$Z_{\text{eff}} = \frac{Z_0}{\frac{1 - S_{11} - n \exp(-ink_0 d) + \exp(ink_0 d)}{1 + S_{11} - n \exp(-ink_0 d) - \exp(ink_0 d)}} \quad (8)$$

利用该模型,可以在已知反射系数 S_{11} 的条件下反演计算出亚波长结构层的等效电阻抗(导纳)。此外,可以根据色散调控的目标推导出理想的阻抗。例如,令公式中 $S_{11} = 0$, 则可获得实现全波段电磁吸收所需的理想阻抗:

$$Z_{\text{ideal}} = \frac{Z_0}{1 - n \frac{\exp(-ink_0 d) + \exp(ink_0 d)}{\exp(-ink_0 d) - \exp(ink_0 d)}} \quad (9)$$

理想阻抗的色散特性如图 21(b)所示,自然界中的材料很难实现该色散特性。因此,色散调控的关键在于采用精确设计的亚波长结构,使其色散特性无限逼近理想色散。

通过对十字形和圆盘形金属结构进行优化设计,将金属膜层的 Drude 色散转化为结构化金属中的 Lorentz 色散,分别实现了宽频段(20~45 THz)(图 20(c))^[48]和宽角度(TM: 0~80°; TE: 0~55°)^[45]的高效(>90%)红外吸波。此外,通过对半导体譬如掺杂硅进行色散调控可以实现太赫兹波段的宽带电磁吸收(图 20(d))^[49],多个课题组分别进行了相关的实验验证,如图 20(e) (f)所示^[140-141, 144]。

上述吸波材料对于普通的物体能够起到一定的 RCS 缩减效果,但对于高温条件下的目标,则需要设计耐高温的吸波材料。通过在 SiC 陶瓷基底上制备镍铬合金薄膜,并用光刻的方法制备出十字形图形(图 22(a)),可在宽带吸收的基础上,进一步提高材料耐高温等极端环境的能力^[14]。除了镍铬合金, TiN 也可用于极端环境下实现电磁吸收^[145]。如图 22(c) (d)所示, TiN 吸波材料在 800°C 退火之后仍能保持高效吸收能力。

最近还出现了几种新型的吸波材料,包括柔性吸波材料^[14, 146]、透明吸波材料^[14]、单向吸波材料^[147]和透波吸波一体化材料^[14],分别满足不同场合的应用需求。其中,可见光透明宽带微波吸收材料,在可见光波段内透过率大于 80%,在 3~16 GHz 频段范围内的吸收率大于 10 dB;对于特定的线偏振入射,单向吸波材料能够实现沿一个方向入射电磁波的高效吸收(~83%),和相反方向入射电磁波的高效透射(~83%)。

在偏振调控方面,复旦大学周磊等于 2007 年利用超构反射镜实现了超薄的微波段偏振转换器^[148](图 23(a))。类似于吸波材料,其同样存在厚度-带宽极限。

基于超构反射镜的色散调控数理模型具有普适性,不仅适用于各向同性材料同样适用于各向异性材料;不仅适用于电磁吸收同样适用于偏振调制。二者的不同之处在于,宽带偏振调制器色散调控的目标是相位差 $\Delta\Phi$ 恒定满足:

$$\Delta\Phi = \left| \arg(S_{11,x}) - \arg(S_{11,y}) \right| = \text{const.} \quad (10)$$

色散调控拓展带宽的思路同样在偏振调制中得到实验验证。基于 I 形金属贴片的一维色散调控实现了微波段相对带宽高达 3:1 的偏振转换(图 23(b))^[46]; Grady 等在太赫兹波段报道了类似的结果(图 23(c))^[149]。基于金属开口谐振环结构同时激发超构反射镜两个主轴上的多重电磁谐振实现二维色散调控,

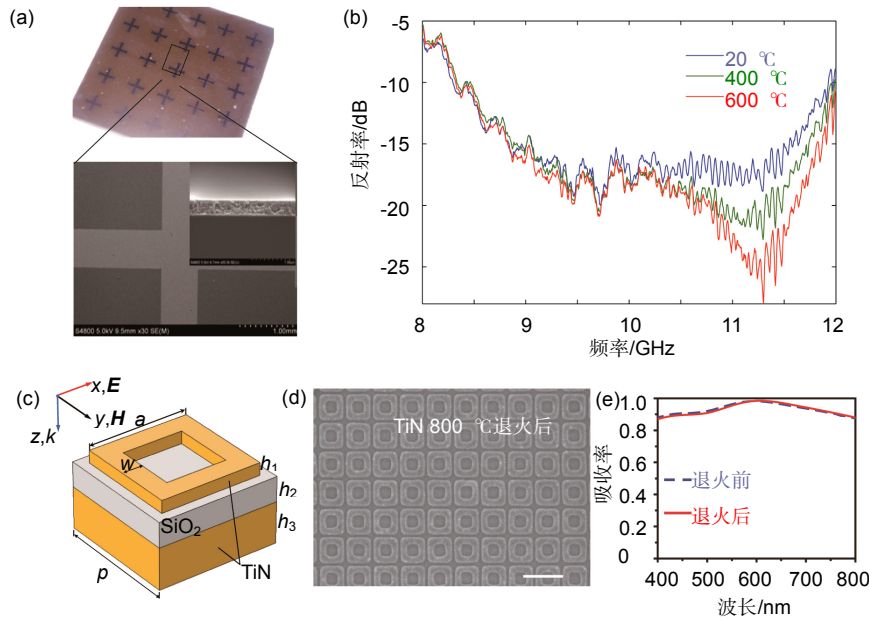


图 22 耐高温吸波材料. (a) 陶瓷基耐高温宽带微波吸收材料及(b)不同温度下的反射率^[14]. (c) TiN 基耐高温可见光吸波材料单元结构. (d) 800℃退火 8 小时后的样品电镜图. (e) 退火前后的吸收效果^[143].

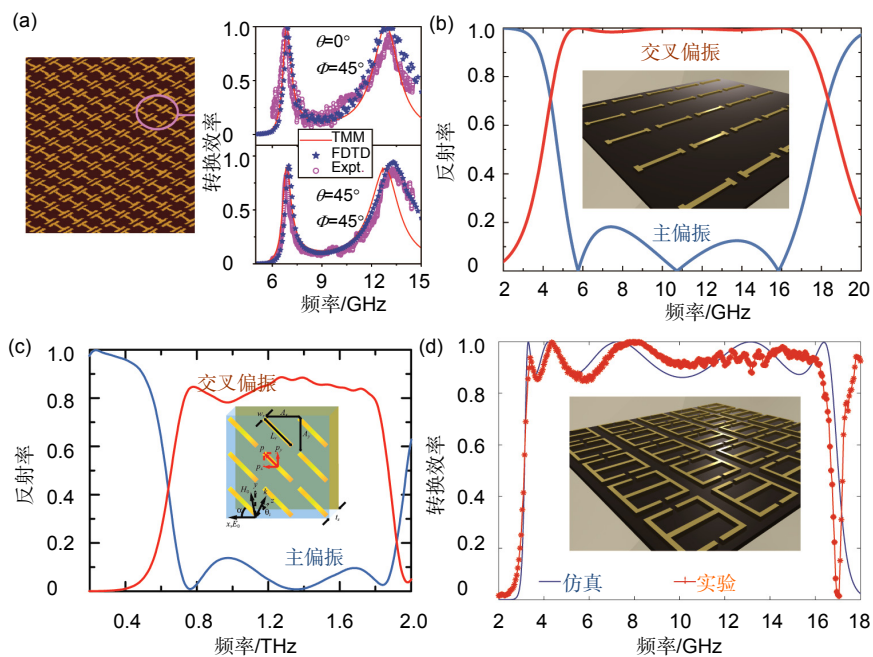


图 23 基于超构反射镜的偏振转换器. (a) 窄带偏振转换器^[148]. (b) 微波段带宽比为 3:1 的偏振转换器^[46]. (c) 太赫兹波段带宽比为 3:1 偏振转换器^[147]. (d) 微波段带宽比为 5:1 的偏振转换器^[47].

获得了微波段相对带宽为 5:1 的超宽带偏振调制效果, 如图 23(d)所示^[47]。

需要指出的是, 色散调控模型提供了一种逼近厚度—带宽比值极限的方法, 但是无法突破该极限。研究指出将色散调控与相干调控技术相结合则能够突破上述极限^[150-153]。通过色散调控使得人工电磁边界在宽波段范围内满足相干条件, 可以实现无色散的电磁调控。例如, 对于无色散的相干完美吸收, 人工电磁边界需要满足 $|r| = |d| = 0.5$ 。深亚波长厚度的阻抗膜层和各向异性网栅结构理论上可以分别实现覆盖从微波到可见光所有频段的电磁吸收和偏振转换(图 24)。通过改变两照明光源的相干程度, 可以动态地调控吸收、偏振和自旋-轨道相互作用^[150-153]。苏州大学候波课题组基于石墨烯和透明导电膜等开展了相干吸收的实验验证^[154-155]。英国南安普顿大学的 Zheludev 等人则基于手性超构材料开展了对相干偏振转换微波段的实验验证^[156]。相干吸收还可用于实现信号的逻辑运算, 为

光计算机提供新的思路^[157]。

3.6 可重构电磁超构材料

前面各节所述的电磁超构材料对电磁波的调制大多是静态的, 仅能实现某种电磁特性的调制, 当外界环境发生变化时, 器件性能有可能下降甚至不能使用。可重构超构材料的核心技术是构造可动态调控的电磁响应结构或元件, 常用的技术手段是在使用柔性衬底或在超构材料中引入电磁参数可随外界环境的变化而发生改变的器件或材料^[158-159], 例如, 二极管、液晶、石墨烯、掺杂半导体、记忆合金、相变材料、MEMS 等。通过在超构表面结构单元中加载 PIN 和变容二极管的方式, 先后出现了双偏振工作的 L 波段动态吸波材料^[160], 同时实现吸波效率和吸波频率可调的 S 波段动态可控材料^[161]和宽带 X~Ku 波段动态吸波可控材料。通过改变二极管的导通状态还能够实现吸波器和反射器的转换^[162-163], 以及电磁波相位延迟^[164]。最近,

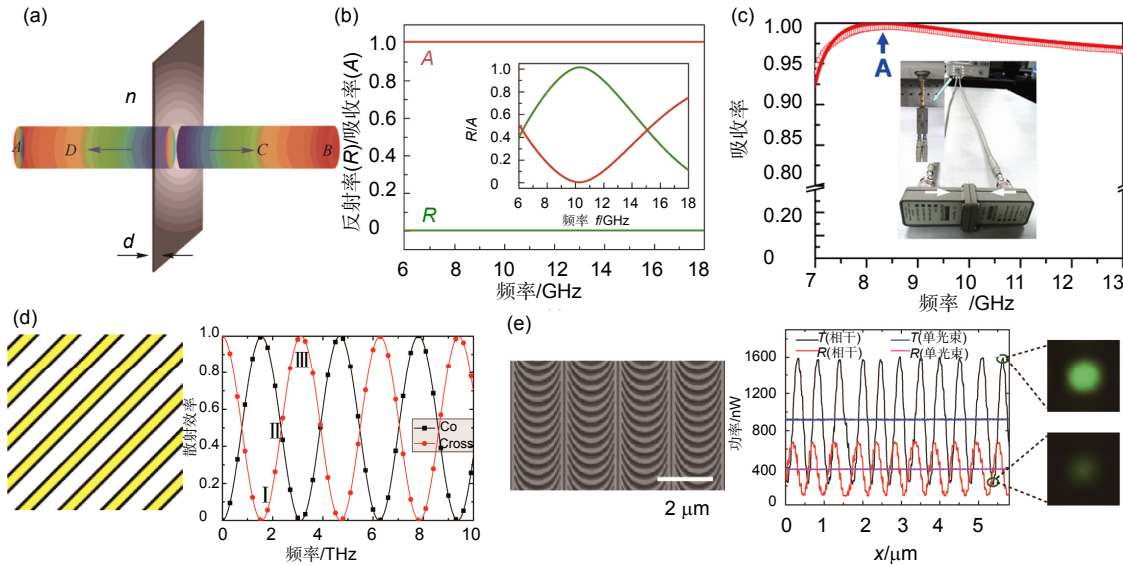


图 24 色散调控在相干调控中的应用. (a) 相干完美吸收理论模型^[150]. (b) 基于导电薄膜^[154]和 (c)单层石墨烯的相干完美吸收^[155]. (d) 相干偏振调控^[152]. (e) 相干散射调控^[153].

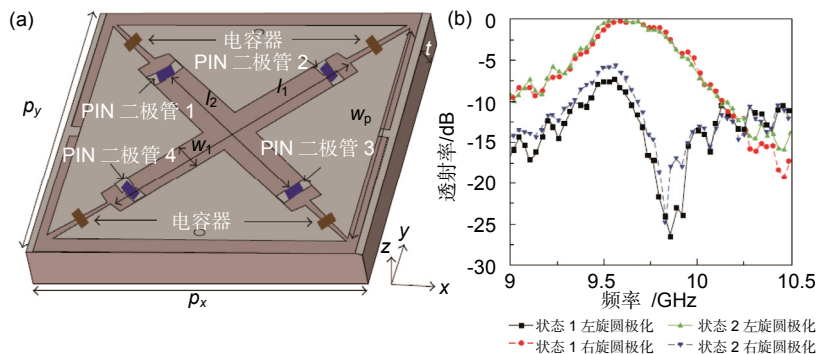


图 25 基于动态色散调控的任意偏振产生^[165]. (a) 单元结构示意图. (b) 实验结果.

基于各向异性结构的动态色散调控实现了任意偏振态的产生(图 25)^[165-167]。

石墨烯、PDMS、二氧化钒(VO_2)、GeSbTe(GST)等新兴材料的引入以及微流控技术等将电磁波的动态调控从微波段扩展到太赫兹、红外及可见光波段^[170]。例如,利用石墨烯良好的光电特性实现了小型的近红外波段电控^[171-172]及光控调制器^[173];利用 PDMS 良好的延展性,实现了可见光波段可变焦距透镜^[168-169]及可变的结构色(图 26)^[23];利用 VO_2 在临界温度处从介质态到金属态的转变,实现了太赫兹波段的动态偏振调控^[174-175];利用 GST 的可擦除、可多次重写的特点,实现了一系列近红外及可见光波段的功能器件^[176-177]。

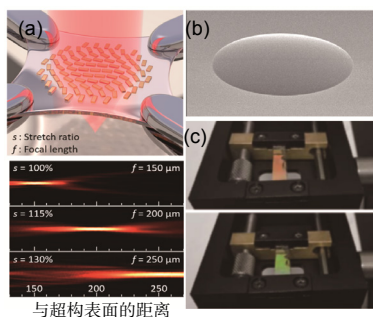


图 26 基于 PDMS 的可重构超材料器件。(a),(b) 可变焦距聚焦透镜^[168-169]。(c) 可变结构色器件^[23]。

4 总结和展望

相比传统光学领域,表面等离子体的超衍射特性与超材料丰富的电磁共振特性为亚波长光学器件的色散调控提供了无尽的可能,具有广泛的应用前景。最近,在超材料领域出现了一些新概念和新方法,如智能超材料和超材料基因工程,有望推动超材料更广泛的应用。

1) 智能超材料

以智能隐身材料为例,其能够实时地跟踪提取雷达辐射的电磁波的幅度、频率、相位及偏振信息,然后利用可重构天线发射与探测雷达相同幅度、频率、相位和偏振的雷达信号,在吸波材料所在的位置形成相干完美吸收。基于这种相干的调制方法,还可对偏振态、传播方向等其它电磁特征进行动态调节,实现更好的隐身效果。

2) 超材料基因工程

复杂多样的结构特性和电磁性质对超材料设计带来了挑战,有必要开展超材料基因工程研究,相应的软件至少应该具备如下功能:

① 拥有丰富的相关单元结构、材料选择、排列方式,

实例模型等数据库;

② 为超材料设计提供全面、智能的计算机辅助;

③ 使用该软件即能设计出实用化的超材料、表面功能器件。

目前已完成超材料的梳理和分类,初步建立相关数据库,但仍处于起步阶段,需要进一步深入研究。

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(61138002),超材料基因工程项目。

参考文献

- 1 Saleh B E A, Teich M C. Fundamentals of Photonics[M]. 2nd ed. New Jersey: Wiley & Sons, 2007.
- 2 Jackson J D. Classical Electrodynamics[M]. 3rd ed. Hoboken: Wiley, 1999.
- 3 Kurtzke C. Suppression of fiber nonlinearities by appropriate dispersion management[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1993, **5**(10): 1250-1253.
- 4 Ganapathy R. Soliton dispersion management in nonlinear optical fibers[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2012, **17**(12): 4544-4550.
- 5 Wang Peng, Mohammad N, Menon R. Chromatic-aberration-corrected diffractive lenses for ultra-broadband focusing[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 21545.
- 6 Kosaka H, Kawashima T, Tomita A, et al. Superprism phenomena in photonic crystals[J]. *Physical Review B*, 1998, **58**(16): R10096-R10099.
- 7 Belshaw N S, Freedman P A, O'Nions R K, et al. A new variable dispersion double-focusing plasma mass spectrometer with performance illustrated for Pb isotopes[J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 1998, **181**(1-3): 51-58.
- 8 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.
- 9 Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 824-830.
- 10 Wood R W. On a remarkable case of uneven distribution of light in a diffraction grating spectrum[J]. *Proceedings of the Physical Society of London*, 1902, **18**: 269.
- 11 Zia R, Schuller J A, Chandran A, et al. Plasmonics: the next chip-scale technology[J]. *Materialstoday*, 2006, **9**(7-8): 20-27.
- 12 Ozbay E. Plasmonics: merging photonics and electronics at nanoscale dimensions[J]. *Science*, 2006, **311**(5758): 189-193.
- 13 Luo Xiangang, Yan Lianshan. Surface plasmon polaritons and its applications[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, **4**(2): 590-595.
- 14 Luo Xiangang. Principles of electromagnetic waves in metasurfaces[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015, **58**(9): 594201.
- 15 Luo Xiangang, Ishihara T. Surface plasmon resonant interference nanolithography technique[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **84**(23): 4780-4782.
- 16 Luo Xiangang, Ishihara T. Subwavelength photolithography based on surface-plasmon polariton resonance[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(14): 3055-3065.

- 17 Fang N, Lee H, Sun Cheng, *et al.* Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens[J]. *Science*, 2005, **308**(5721): 534–537.
- 18 Liu Zhaowei, Wei Qihuo, Zhang Xiang. Surface Plasmon interference nanolithography[J]. *Nano Letters*, 2005, **5**(5): 957–961.
- 19 Gao Ping, Yao Na, Wang Changtao, *et al.* Enhancing aspect profile of half-pitch 32 nm and 22 nm lithography with plasmonic cavity lens[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, **106**(9): 093110.
- 20 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.
- 21 Maier S A. Plasmonics: Fundamentals and Applications[M]. New York: Springer, 2007.
- 22 Atwater H A. The promise of plasmonics[J]. *Scientific American*, 2007, **296**: 56–62.
- 23 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 & Propagation*, 2015, **2015**: 204127.
- 24 Raether H. Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1988.
- 25 Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. *Physical Review Letters*, 2000, **85**(18): 3966–3969.
- 26 Melville D O S, Blaikie R J. Super-resolution imaging through a planar silver layer[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(6): 2127–2134.
- 27 Ramakrishna S A, Pendry J B, Wiltshire M C K, *et al.* Imaging the near field[J]. *Journal of Modern Optics*, 2003, **50**(9): 1419–1430.
- 28 Xiong Yi, Liu Zhaowei, Sun Cheng, *et al.* Two-dimensional Imaging by far-field superlens at visible wavelengths[J]. *Nano Letters*, 2007, **7**(11): 3360–3365.
- 29 Xu T, Fang L, Ma J, *et al.* Localizing surface plasmons with a metal-cladding superlens for projecting deep-subwavelength patterns[J]. *Applied Physics B*, 2009, **97**(1): 175–179.
- 30 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.
- 31 High A A, Devlin R C, Dibos A, *et al.* Visible-frequency hyperbolic metasurface[J]. *Nature*, 2015, **522**(7555): 192–196.
- 32 Salandrino A, Engheta N. Far-field subdiffraction optical microscopy using metamaterial crystals: theory and simulations[J]. *Physical Review B*, 2006, **74**(7): 075103.
- 33 Smolyaninov I I, Hung Y J, Davis C C. Magnifying superlens in the visible frequency range[J]. *Science*, 2007, **315**(5819): 1699–1701.
- 34 Jacob Z, Alekseyev L V, Narimanov E. Optical hyperlens: far-field imaging beyond the diffraction limit[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(18): 8247–8256.
- 35 Guo Z, Zhao Z Y, Yan L S, *et al.* Moiré fringes characterization of surface plasmon transmission and filtering in multi metal-dielectric films[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **105**(14): 141107.
- 36 Xu Ting, Lezec H J. Visible-frequency asymmetric transmission devices incorporating a hyperbolic metamaterial[J]. *Nature Communications*, 2014, **5**: 4141.
- 37 Xu Ting, Zhao Yanhui, Ma Junxian, *et al.* Sub-diffraction-limited interference photolithography with metamaterials[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(18): 13579–13584.
- 38 Xiong Yi, Liu Zhaowei, Zhang Xiang. Projecting deep-subwavelength patterns from diffraction-limited masks using metal-dielectric multilayers[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **93**(11): 111116.
- 39 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.
- 40 Guo Yinghui, Yan Lianshan, Pan Wei, *et al.* A plasmonic splitter based on slot cavity[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(15): 13831–13838.
- 41 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.
- 42 Shi Haofei, Wang Changtao, Du Chunlei, *et al.* Beam manipulating by metallic nano-slits with variant widths[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(18): 6815–6820.
- 43 Yu Nanfang, 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.
- 44 Xu Yadong, Fu Yangyang, Chen Huanyang. Planar gradient metamaterials. *Nature Reviews Materials*, 2016, **1**: 16067.
- 45 Pu Mingbo, Hu Chenggang, Wang Min, *et al.* Design principles for infrared wide-angle perfect absorber based on plasmonic structure[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(18): 17413–17420.
- 46 Pu Mingbo, Chen Po, Wang Yanqi, *et al.* Anisotropic meta-mirror for achromatic electromagnetic polarization manipulation[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **102**(13): 131906.
- 47 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.
- 48 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.
- 49 Pu Mingbo, Wang Min, Hu Chenggang, *et al.* Engineering heavily doped silicon for broadband absorber in the terahertz regime[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(23): 25513–25519.
- 50 Ye Dexin, Wang Zhiyu, Xu Kuiwen, *et al.* Ultrawideband dispersion control of a metamaterial surface for perfectly-matched-layer-like absorption[J]. *Physical Review Letters*, 2013, **111**(18): 187402.
- 51 Dirdal C A, Skaar J. Superpositions of Lorentzians as the class of causal functions[J]. *Physical Review A*, 2013, **88**(3): 033834.
- 52 Jiang Zhihao, Yun S, Lin Lan, *et al.* Tailoring dispersion for broadband low-loss optical metamaterials using deep-subwavelength inclusions[J]. *Scientific Reports*, 2013, **3**: 1571.
- 53 Luo Xiangang, Ishihara T. Sub 100 nm lithography based on plasmon polariton resonance[C]. Proceedings of 2003 International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Tokyo, Japan, 2003: 138–139.
- 54 Yao Hanmin, Yu Guobin, Yan Peiyong, *et al.* Patterning sub 100 nm isolated patterns with 436 nm lithography[C]. Proceedings of 2003 International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Tokyo, Japan, 2003: 130.
- 55 Wang Changtao, Gao Ping, Zhao Zeyu, *et al.* Deep sub-wavelength imaging lithography by a reflective plasmonic slab[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(18): 20683–20691.
- 56 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.
- 57 Zhao Zeyu, Luo Yunfei, Zhang Wei, *et al.* Going far beyond the near-field diffraction limit via plasmonic cavity lens with high spatial frequency spectrum off-axis illumination[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 15320.
 - 58 Liu Zhaowei, Lee H, Xiong Yi, *et al.* Far-field optical hyperlens magnifying sub-diffraction-limited objects[J]. *Science*, 2007, **315**(5819): 1686.
 - 59 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.
 - 60 Liu Ling, Liu Kaipeng, Zhao Zeyu, *et al.* Sub-diffraction demagnification imaging lithography by hyperlens with plasmonic reflector layer[J]. *RSC Advances*, 2016, **6**: 95973-95978.
 - 61 Sun Jingbo, Xu T, Litchinitser N M. Experimental demonstration of demagnifying hyperlens[J]. *Nano Letters*, 2016, **16**(12): 7905-7909.
 - 62 Pendry J B, Schurig D, Smith D R. Controlling electromagnetic fields[J]. *Science*, 2006, **312**(5781): 1780–1782.
 - 63 Leonhardt U. Optical conformal mapping[J]. *Science*, 2006, **312**(5781): 1777–1780.
 - 64 Schurig D, Mock J J, Justice B J, *et al.* Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. *Science*, 2006, **314**(5801): 977–980.
 - 65 Hashemi H, Zhang Baile, Joannopoulos J D, *et al.* Delay-bandwidth and delay-loss limitations for cloaking of large objects[J]. *Physical Review Letters*, 2010, **104**(25): 253903.
 - 66 Li J, Pendry J B. Hiding under the carpet: a new strategy for cloaking[J]. *Physical Review Letters*, 2008, **101**(20): 203901.
 - 67 Liu R, Ji C, Mock J J, *et al.* Broadband ground-plane cloak[J]. *Science*, 2009, **323**(5912): 366–369.
 - 68 Valentine J, Li J, Zentgraf T, *et al.* An optical cloak made of dielectrics[J]. *Nature Materials*, 2009, **8**(7): 568–571.
 - 69 Gabrielli L H, Cardenas J, Poitras C B, *et al.* Silicon nanostructure cloak operating at optical frequencies[J]. *Nature Photonics*, 2009, **3**(8): 461–463.
 - 70 Kundtz N, Smith D R. Extreme-angle broadband metamaterial lens[J]. *Nature Materials*, 2010, **9**(2): 129–132.
 - 71 Ma Huifeng, Cui Tiejun. Three-dimensional broadband and broad-angle transformation-optics lens[J]. *Nature Communications*, 2010, **1**(8): 124.
 - 72 Zentgraf T, Liu Yongmin, Mikkelsen M H, *et al.* Plasmonic Luneburg and Eaton lenses[J]. *Nature Nanotechnology*, 2011, **6**(3): 151–155.
 - 73 Narimanov E E, Kildishev A V. Optical black hole: broadband omnidirectional light absorber[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **95**(4): 041106.
 - 74 Cheng Qiang, Cui Tiejun, Jiang Weixiang, *et al.* An omnidirectional electromagnetic absorber made of metamaterials[J]. *New Journal of Physics*, 2010, **12**(6): 063006.
 - 75 Sheng Chong, Liu Hui, Wang Yueheng, *et al.* Trapping light by mimicking gravitational lensing[J]. *Nature Photonics*, 2013, **7**(11): 902–906.
 - 76 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.
 - 77 Ni Xingjie, Wong Zijng, Mrejen M, *et al.* An ultrathin invisibility skin cloak for visible light[J]. *Science*, 2015, **349**(6254): 1310–1314.
 - 78 Marrucci L, Manzo C, Paparo D. Optical spin-to-orbital angular momentum conversion in inhomogeneous anisotropic media[J]. *Physical Review Letters*, 2006, **96**(16): 163905.
 - 79 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.
 - 80 Guo Yinghui, Yan Lianshan, Pan Wei, *et al.* Scattering engineering in continuously shaped metasurface: an approach for electromagnetic illusion[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 30154.
 - 81 Lier E, Werner D H, Scarborough C P, *et al.* An octave-bandwidth negligible-loss radiofrequency metamaterial[J]. *Nature Materials*, 2011, **10**(3): 216–222.
 - 82 Enoch S, Tayeb G, Sabouroux P, *et al.* A metamaterial for directive emission[J]. *Physical Review Letters*, 2002, **89**(21): 213902.
 - 83 Wang Min, Huang Cheng, Pu Mingbo, *et al.* Electric-controlled scanning Luneburg lens based on metamaterials[J]. *Applied Physics A*, 2013, **111**(2): 445–450.
 - 84 Bharadwaj P, Deutsch B, Novotny L. Optical antennas[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2009, **1**(3): 438–483.
 - 85 Fang Zheyu, Fan Linran, Lin Chenfang, *et al.* Plasmonic coupling of bow tie antennas with Ag nanowire[J]. *Nano Letters*, 2011, **11**(4): 1676–1680.
 - 86 Greffet J J. Nanoantennas for light emission[J]. *Science*, 2005, **308**(5728): 1561–1562.
 - 87 Lezec H J, Degiron A, Devaux E, *et al.* Beaming light from a subwavelength aperture[J]. *Science*, 2002, **297**(5582): 820–822.
 - 88 Martín-Moreno L, Garcia-Vidal F J, Lezec H J, *et al.* Theory of highly directional emission from a single subwavelength aperture surrounded by surface corrugations[J]. *Physical Review Letters*, 2003, **90**(16): 167401.
 - 89 Wang Changtao, Du Chunlei, Luo Xiangang. Refining the model of light diffraction from a subwavelength slit surrounded by grooves on a metallic film[J]. *Physical Review B*, 2006, **74**(24): 245403.
 - 90 Wang Changtao, Du Chunlei, Lv Yueguang, *et al.* Surface electromagnetic wave excitation and diffraction by subwavelength slit with periodically patterned metallic grooves[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(12): 5671–5681.
 - 91 Li X, Zhao Z, Feng Q, *et al.* Abnormal nearly homogeneous radiation by slit-grooves structure[J]. *Applied Physics B*, 2011, **102**(4): 851–855.
 - 92 Yu Nanfang, Kats M A, Pflügl C, *et al.* Multi-beam multi-wavelength semiconductor lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **95**(16): 161108.
 - 93 Yu Nanfang, Fan J, Wang Qijie, *et al.* Small-divergence semiconductor lasers by plasmonic collimation[J]. *Nature Photonics*, 2008, **2**(9): 564–570.
 - 94 Yu Nanfang, Capasso F. Wavefront engineering for mid-infrared and terahertz quantum cascade lasers [Invited][J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, **27**(11): B18–B35.
 - 95 Aouani H, Mahboub O, Bonod N, *et al.* Bright unidirectional fluorescence emission of molecules in a nanoaperture with plasmonic corrugations[J]. *Nano Letters*, 2011, **11**(2): 637–644.
 - 96 Jun Y C, Huang K C Y, Brongersma M L. Plasmonic beaming and active control over fluorescent emission[J]. *Nature Communications*, 2011, **2**: 283.
 - 97 Gorodetski Y, Drezet A, Genet C, *et al.* Generating far-field orbital angular momenta from near-field optical chirality[J]. *Physical Review Letters*, 2013, **110**(20): 203906.
 - 98 Pu Mingbo, Ma Xiaoliang, Zhao Zeyu, *et al.* Near-field collimation of light carrying orbital angular momentum with bull's-eye-

- assisted plasmonic coaxial waveguides[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 12108.
- 99 Yu Nanfang, Wang Qijie, Kats MA, *et al.* Designer spoof surface plasmon structures collimate terahertz laser beams[J]. *Nature Materials*, 2010, **9**(9): 730–735.
- 100 Huang Cheng, Zhao Zeyu, Feng Qin, *et al.* Grooves-assisted surface wave modulation in two-slot array for mutual coupling reduction and gain enhancement[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2009, **8**: 912–915.
- 101 Huang Cheng, Du Chunlei, Luo Xiangang. A waveguide slit array antenna fabricated with subwavelength periodic grooves[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **91**(14): 143512.
- 102 Xu Ting, Wang Changtao, Du Chunlei, *et al.* Plasmonic beam deflector[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(7): 4753–4759.
- 103 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.
- 104 Xu Ting, Du Chunlei, Wang Changtao, *et al.* Subwavelength imaging by metallic slab lens with nanoslits[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **91**(20): 201501.
- 105 Verslegers L, Catrysse P B, Yu Zongfu, *et al.* Planar lenses based on nanoscale slit arrays in a metallic film[J]. *Nano Letters*, 2009, **9**(1): 235–238.
- 106 Ishii S, ShalaeV M, Kildishev A V. Holey-metal lenses: sieving single modes with proper phases[J]. *Nano Letters*, 2013, **13**(1): 159–163.
- 107 Xu Ting, Zhao Yanhui, Gan Dachun, *et al.* Directional excitation of surface plasmons with subwavelength slits[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**(10): 101501.
- 108 Sun Jingbo, Wang Xi, Xu T, *et al.* Spinning light on the nanoscale[J]. *Nano Letters*, 2014, **14**(5): 2726–2729.
- 109 West P R, Stewart J L, Kildishev A V, *et al.* All-dielectric subwavelength metasurface focusing lens[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(21): 26212–26221.
- 110 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]. *Nature Communications*, 2015, **6**: 7069.
- 111 Sun Shulin, He Qiong, Xiao Shiyi, *et al.* Gradient-index metasurfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves[J]. *Nature Materials*, 2012, **11**(5): 426–431.
- 112 Hasman E, Kleiner V, Biener G, *et al.* Polarization dependent focusing lens by use of quantized pancharatnam–berry phase diffractive optics[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **82**(3): 328–330.
- 113 Ni Xingjie, Emani N K, Kildishev A V, *et al.* Broadband light bending with plasmonic nanoantennas[J]. *Science*, 2012, **335**(6067): 427.
- 114 Ni Xingjie, Ishii S, Kildishev A V, *et al.* Ultra-thin, planar, Babinet-inverted plasmonic metalenses[J]. *Light: Science & Applications*, 2013, **2**(4): e72.
- 115 Qin Fei, Ding Lu, Zhang Lei, *et al.* Hybrid bilayer plasmonic metasurface efficiently manipulates visible light[J]. *Science Advances*, 2016, **2**(1): e1501168.
- 116 Zhang Xueqian, Tian Zhen, Yue Weisheng, *et al.* Broadband terahertz wave deflection based on C-shape complex metamaterials with phase discontinuities[J]. *Advanced Materials*, 2013, **25**(33): 4567–4572.
- 117 Liu Lixiang, Zhang Xueqian, Kenney M, *et al.* Broadband metasurfaces with simultaneous control of phase and amplitude[J]. *Advanced Materials*, 2014, **26**(29): 5031–5036.
- 118 Zhang Xueqian, Xu Yuehong, Yue Weisheng, *et al.* Anomalous surface wave launching by handedness phase control[J]. *Advanced Materials*, 2015, **27**(44): 7123–7129.
- 119 Sun Shulin, Yang Kuangyu, Wang C M, *et al.* High-efficiency broadband anomalous reflection by gradient meta-surfaces[J]. *Nano Letters*, 2012, **12**(12): 6223–6229.
- 120 Li Yongfeng, Zhang Jieqiu, Qu Shaobo, *et al.* Wideband radar cross section reduction using two-dimensional phase gradient metasurfaces[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **104**(22): 221110.
- 121 Giovampola C D, Engheta N. Digital metamaterials[J]. *Nature Materials*, 2014, **13**(12):1115–1121.
- 122 Cui Tiejun, Qi Meiqing, Wan Xiang, *et al.* Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, **3**(10): e218.
- 123 Gao Lihua, Cheng Qiang, Yang Jing, *et al.* Broadband diffusion of terahertz waves by multi-bit coding metasurfaces[J]. *Light: Science & Applications*, 2015, **4**(9): e324.
- 124 Li Xiong, Pu Mingbo, Zhao Zeyu, *et al.* Catenary nanostructures as compact Bessel beam generators[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 20524.
- 125 Luo Xiangang, Pu Mingbo, Li Xiong, *et al.* Broadband spin Hall effect of light in single nanoapertures[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, **6**: e16276. (in press)
- 126 Sun Hongbo. The mystical interlinks: Mechanics, religion or optics?[J]. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2016, **59**: 614202.
- 127 Hong Minghui. Metasurface wave in planar nano-photonics[J]. *Science Bulletin*, 2016, **61**(2):112–113.
- 128 Ding Xumin, Monticone F, Zhang Kuang, *et al.* Ultrathin pancharatnam–berry metasurface with maximal cross-polarization efficiency[J]. *Advanced Materials*, 2015, **27**(7): 1195–1200.
- 129 Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, *et al.* Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, **100**(20): 207402.
- 130 Shen Xiaopeng, Cui Tiejun, Zhao Junming, *et al.* Polarization-independent wide-angle triple-band metamaterial absorber [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(10): 9401–9407.
- 131 Ye Yuqian, Jin Yi, He Sailing. Omnidirectional, polarization-insensitive and broadband thin absorber in the terahertz regime[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, **27**(3): 498–504.
- 132 Grant J, Ma Yong, Saha S, *et al.* Polarization insensitive, broadband terahertz metamaterial absorber[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(17): 3476–3478.
- 133 Hendrickson J, Guo Junpeng, Zhang Boyang, *et al.* Wideband perfect light absorber at midwave infrared using multiplexed metal structures[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(3): 371–373.
- 134 Cui Yanxia, Xu Jun, Fung K H, *et al.* A thin film broadband absorber based on multi-sized nanoantennas[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **99**(25): 253101.
- 135 Wang Jing, Chen Yiting, Chen Xi, *et al.* Photothermal reshaping of gold nanoparticles in a plasmonic absorber[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(15): 14726–14734.
- 136 Hao Jiaming, Zhou Lei, Qiu Min. Nearly total absorption of light and heat generation by plasmonic metamaterials[J]. *Physical Review B*, 2011, **83**(16): 165107.
- 137 Guo Yinghui, Yan Lianshan, Pan Wei, *et al.* Ultra-broadband terahertz absorbers based on 4 × 4 cascaded metal-dielectric pairs[J]. *Plasmonics*, 2014, **9**(4): 951–957.
- 138 Ding Fei, Cui Yanxia, Ge Xiaochen, *et al.* Ultra-broadband microwave metamaterial absorber[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **100**(10): 3506.

- 139 Cui Yanxia, Fung K H, Xu Jun, *et al.* Ultrabroadband light absorption by a sawtooth anisotropic metamaterial slab[J]. *Nano Letters*, 2012, **12**(3): 1443–1447.
- 140 Yin Sheng, Zhu Jianfei, Xu Wendao, *et al.* High-performance terahertz wave absorbers made of silicon-based metamaterials [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, **107**(7): 73903.
- 141 Zang Xiaofei, Shi Cheng, Chen Lin, *et al.* Ultra-broadband terahertz absorption by exciting the orthogonal diffraction in dumbbell-shaped gratings[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 8091.
- 142 Rozanov K N. Ultimate thickness to bandwidth ratio of radar absorbers[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2000, **48**(8): 1230–1234.
- 143 Guo Yinghui, Yan Lianshan, Pan Wei, *et al.* Achromatic polarization manipulation by dispersion management of anisotropic meta-mirror with dual-metasurface[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(21): 27566–27575.
- 144 Shi Cheng, Zang Xiaofei, Wang Yiqiao, *et al.* A polarization-independent broadband terahertz absorber[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **105**(3): 031104.
- 145 Li Wei, Guler U, Kinsey N, *et al.* Refractory plasmonics with titanium nitride: broadband metamaterial absorber[J]. *Advanced Materials*, 2014, **26**(47): 7959–7965.
- 146 Jang T, Youn H, Shin Y J, *et al.* Transparent and flexible polarization-independent microwave broadband absorber[J]. *ACS Photonics*, 2014, **1**(3): 279–284.
- 147 Zhao Junming, Sun Liang, Zhu Bo, *et al.* One-way absorber for linearly polarized electromagnetic wave utilizing composite metamaterial[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(4): 4658–4665.
- 148 Hao Jiaming, Yuan Yu, Ran Lixin, *et al.* Manipulating electromagnetic wave polarizations by anisotropic metamaterials[J]. *Physical Review Letters*, 2007, **99**(6): 063908.
- 149 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.
- 150 Pu Mingbo, Feng Qin, Wang Min, *et al.* Ultrathin broadband nearly perfect absorber with symmetrical coherent illumination[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(3): 2246–2254.
- 151 Pu Mingbo, Feng Qin, Hu Chenggang, *et al.* Perfect absorption of light by coherently induced plasmon hybridization in ultrathin metamaterial film[J]. *Plasmonics*, 2012, **7**(4): 733–738.
- 152 Wang Yanqin, Pu Mingbo, Hu Chenggang, *et al.* Dynamic manipulation of polarization states using anisotropic meta-surface [J]. *Optics Communications*, 2014, **319**: 14–16.
- 153 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**: 659–663.
- 154 Li Sucheng, Luo Jie, Anwar S, *et al.* Broadband perfect absorption of ultrathin conductive films with coherent illumination: superabsorption of microwave radiation[J]. *Physical Review B*, 2015, **91**(22): 220301.
- 155 Li Sucheng, Duan Qian, Li Shuo, *et al.* Perfect electromagnetic absorption at one-atom-thick scale[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, **107**: 181112.
- 156 Mousavi S A, Plum E, Shi Jinhui, *et al.* Coherent control of optical polarization effects in metamaterials[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 8977.
- 157 Papaioannou M, Plum E, Valente J, *et al.* Two-dimensional control of light with light on metasurfaces[J]. *Light: Science & Applications*, 2016, **5**: e16070.
- 158 Fan Kebin, Padilla W J. Dynamic electromagnetic metamaterials [J]. *Materialstoday*, 2015, **18**(1): 39–50.
- 159 Zheludev N I, Plum E. Reconfigurable nanomechanical photonic metamaterials[J]. *Nature Nanotechnology*, 2016, **11**(1): 16–22.
- 160 Wang Min, Hu Chenggang, Pu Mingbo, *et al.* Electrical tunable L-band absorbing material for two polarisations[J]. *Electronics Letters*, 2012, **48**(16): 1002–1003.
- 161 Wu Xiaoyu, Hu Chenggang, Wang Yanqin, *et al.* Active microwave absorber with the dual-ability of dividable modulation in absorbing intensity and frequency[J]. *AIP Advances*, 2013, **3**(2): 022114.
- 162 Zhu Bo, Feng Yijun, Zhao Junming, *et al.* Switchable metamaterial reflector/absorber for different polarized electromagnetic waves[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **97**(5): 051906.
- 163 Zhu Bo, Feng Yijun, Zhao Junming, *et al.* Polarization modulation by tunable electromagnetic metamaterial reflector/absorber [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(22): 23196–23203.
- 164 Zhu Bo, Zhao Junming, Feng Yijun. Active impedance metasurface with full 360° reflection phase tuning[J]. *Scientific Reports*, 2013, **3**: 3059.
- 165 Ma Xiaoliang, Pan Wenbo, Huang Cheng, *et al.* An active metamaterial for polarization manipulating[J]. *Advanced Optical Materials*, 2014, **2**(10): 945–949.
- 166 Cui Jianhua, Huang Cheng, Pan Wenbo, *et al.* Dynamical manipulation of electromagnetic polarization using anisotropic meta-mirror[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 30771.
- 167 Xu Hexiu, Sun Shulin, Tang Shiwei, *et al.* Dynamical control on helicity of electromagnetic waves by tunable metasurfaces[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 27503.
- 168 Ee H S, Agarwal R. Tunable metasurface and flat optical zoom lens on a stretchable substrate[J]. *Nano Letters*, 2016, **16**(4): 2818–2823.
- 169 Chen J, Wang Weisong, Ji Fang, *et al.* Variable-focusing microlens with microfluidic chip[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2004, **14**(5): 675–680.
- 170 Shaltout A M, Kildishev A V, Shalae V M. Evolution of photonic metasurfaces: from static to dynamic[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2016, **33**(3): 501–510.
- 171 Liu Ming, Yin Xiaobo, Ulin-Avila E, *et al.* A graphene-based broadband optical modulator[J]. *Nature*, 2011, **474**(7349): 64–67.
- 172 Fang Zheyu, Wang Yumin, Schlather A E, *et al.* Active tunable absorption enhancement with graphene nanodisk arrays[J]. *Nano Letters*, 2014, **14**(1): 299–304.
- 173 Li Wei, Chen Bigeng, Meng Chao, *et al.* Ultrafast all-optical graphene modulator[J]. *Nano Letters*, 2014, **14**(2): 955–959.
- 174 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.
- 175 Wang Dacheng, Zhang Lingchao, Gong Yandong, *et al.* Multi-band switchable terahertz quarter-wave plates via phase-change metasurfaces[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, **8**(1): 5500308.
- 176 Wang Qian, Rogers E T F, Gholipour B, *et al.* Optically reconfigurable metasurfaces and photonic devices based on phase change materials[J]. *Nature Photonics*, 2016, **10**(1): 60–65.
- 177 Chen Yiguo, Li Xiong, Sonnefraud Y, *et al.* Engineering the phase front of light with phase-change material based planar lenses[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 8660.