

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

片上光学近场的远场辐射调控

陈宜臻, 潘威康, 金相宇, 何琼, 周磊, 孙树林

引用本文:

陈宜臻, 潘威康, 金相宇, 等. 片上光学近场的远场辐射调控[J]. *光电工程*, 2023, **50**(8): 230173.

Chen Y Z, Pan W K, Jin X Y, et al. Far-field radiation manipulations of on-chip optical near-fields[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(8): 230173.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.230173>

收稿日期: 2023-07-16; 修改日期: 2023-08-20; 录用日期: 2023-08-21

相关论文

Optical near-field imaging and nanostructuring by means of laser ablation

Johannes Boneberg, Paul Leiderer

Opto-Electronic Science 2022, **1**(1): 210003 doi: [10.29026/oes.2022.210003](https://doi.org/10.29026/oes.2022.210003)

基于片上超表面的多路方向复用全息术

杨睿, 于千茜, 潘一苇, 陈思涵, 张宸, 叶宏, 周鑫尧, 时阳阳, 万帅, 刘阳, 李仲阳

光电工程 2022, **49**(10): 220177 doi: [10.12086/oe.2022.220177](https://doi.org/10.12086/oe.2022.220177)

Planar peristrophic multiplexing metasurfaces

Jia Chen, Dapeng Wang, Guangyuan Si, Siew Lang Teo, Qian Wang, Jiao Lin

Opto-Electronic Advances 2023, **6**(8): 220141 doi: [10.29026/oea.2023.220141](https://doi.org/10.29026/oea.2023.220141)

Spatiotemporal Fourier transform with femtosecond pulses for on-chip devices

Yulong Wang, Changjun Min, Yuquan Zhang, Xiaocong Yuan

Opto-Electronic Advances 2022, **5**(11): 210047 doi: [10.29026/oea.2022.210047](https://doi.org/10.29026/oea.2022.210047)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



DOI: 10.12086/oe.2023.230173

片上光学近场的远场辐射调控

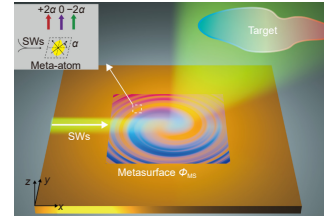
陈宜臻¹, 潘威廉¹, 金相宇¹, 何琼², 周磊², 孙树林^{1*}¹复旦大学信息科学与工程学院, 上海超精密光学制造工程技术研究中心, 上海 200433;²复旦大学物理学系, 应用表面物理国家重点实验室, 上海 200433

摘要: 表面波作为一种信息或能量传递载体, 在片上光学器件及系统中具有重要应用, 然而实现近场表面波到远场传输波的高效自由调控是片上光子学领域中的基础难题。本文从表面波的远场辐射原理出发, 介绍了人们利用超表面对表面波辐射场的相位、振幅、偏振态等多种参量的调控能力, 以及表面波的定向辐射、远场聚焦、特殊光束激发、全息成像等复杂波前调控效应, 最后对表面波远场辐射调控的主要挑战和未来发展做了总结。

关键词: 片上光场; 表面波; 远场辐射; 超构表面

中图分类号: O436

文献标志码: A



陈宜臻, 潘威廉, 金相宇, 等. 片上光学近场的远场辐射调控 [J]. 光电工程, 2023, 50(8): 230173

Chen Y Z, Pan W K, Jin X Y, et al. Far-field radiation manipulations of on-chip optical near-fields[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(8): 230173

Far-field radiation manipulations of on-chip optical near-fields

Chen Yizhen¹, Pan Weikang¹, Jin Xiangyu¹, He Qiong², Zhou Lei², Sun Shulin^{1*}¹Shanghai Engineering Research Centre of Ultra Precision Optical Manufacturing, School of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China;²State Key Laboratory of Surface Physics and Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract: Surface wave (SW), as a kind of information or energy transportation platform, can find important applications in on-chip optical devices and systems. However, the efficient and free control from near-field SW to far-field propagation wave still suffers from fundamental challenges in the field of on-chip photonics. This paper starts with an introduction of the basic principles for far-field radiation. Then it reviews the approaches to control the multiple parameters (e.g., phase, amplitude, and polarization state) of the SW's radiation field based on the metasurface, as well as the complex far-field wavefront manipulation of the surface wave, such as the directional radiation, far-field focusing, special beam excitation, and holographic imaging. Finally, the main challenges and future developments of far-field radiation control of SWs are summarized.

Keywords: on-chip optical fields; surface wave; far-field radiation; metasurface

收稿日期: 2023-07-16; 修回日期: 2023-08-20; 录用日期: 2023-08-21

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFA0710100, 2022YFA1404700); 国家自然科学基金项目 (12221004, 62192771, 62005197); 上海市科技创新行动计划 (20JC1414601)

*通信作者: 孙树林, sls@fudan.edu.cn。

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

1 引言

近年来, 纳米科学与技术的飞速进步赋予了人们在微纳尺度下对光进行传输及操控的能力, 这使得光学器件能够朝着未来所需的片上化、小型化和多功能化等方向发展, 特别是光子集成芯片^[1](photonic integrated circuit, PIC)这一概念得到了越来越多研究人员的关注。所谓光子集成芯片, 就是指由一系列微纳尺度的光控元件集成在一块基片上形成的微型光学系统, 不同于传统的三维光学器件对自由空间传输光的调控, 片上光子集成芯片主要针对局域在二维界面上或者波导结构中的近场光进行调控, 包括了常见的金属-介质界面或二维材料界面上的表面等离子激元^[2](surface plasmon polaritons, SPPs)模式、金属微结构界面上的人工表面等离子激元^[3](spoof surface plasmon polaritons, SSPPs)和介质波导体系中的波导模式(Waveguide Modes, WMs)等。这是一类光场能量被局域在波长甚至亚波长尺度下的本征局域电磁波模式, 也可统称为表面波(surface waves, SWs)。得益于局域场增强以及亚波长分辨率等特性, 表面波在增强光学非线性效应^[4]、光学传感^[5]、超分辨成像^[6]、光力操控^[7]等领域具有广泛的应用。然而, 由于表面波的能量是局域在近场区域, 难以在远场进行直接观测和分析, 所以往往需要借助扫描近场光学显微镜等侦测装置, 但是这类方法存在系统复杂、探测条件苛刻等挑战; 另外, 在超分辨成像^[6]、全息器件^[8]、光学天线^[9]等集成光学应用场景下, 我们需要将近场表面波模式解耦为远场传输波模式, 因此研究表面波的远场辐射效应及其调控手段具有重要的科学意义和应用价值。

事实上, 表面波的辐射调控研究早在几十年前就已经开始得到人们的关注, 其中“漏波天线”就是一种典型的应用。早期的漏波天线是由开缝矩形波导构成的, 波导内部的电磁波信号在传输的过程中逐渐在开口狭缝处被散射到自由空间中^[10]。后来, 微带线、共面波导等天线结构的发展以及印刷电路板(printed circuit board, PCB)加工技术的成熟, 使得漏波天线进一步走向了小型化、平面化、集成化的发展方向^[11]。然而, 漏波天线只是利用周期性结构提供的倒格矢来实现一些定向辐射和波束扫描功能, 存在功能受限、应用场景单一等挑战, 难以实现较为复杂的远场辐射调控效应。

近年来, 近场超分辨成像、增强现实、激光雷达等新型光学应用的涌现, 促使人们需要在不同频段操

纵近场光到远场光的辐射效应, 甚至是需要实现对近场光的远场辐射振幅、相位和偏振等多重自由度进行全方位、多功能的调控。为此, 人们早期发展了布拉格衍射光学元件来实现局域光场的辐射调控效应, 包括均匀型及渐变型衍射光栅, 然而这类器件存在效率低、尺寸大、调控自由度少等问题。最近, 人们提出了利用二维超表面调控近场表面波的远场辐射行为, 这是由一系列精心设计的亚波长人工微结构单元按照特定顺序排列组成的人工电磁表面结构^[12-14], 相对于传统的三维光学器件及二维衍射光栅, 二维超表面可以在亚波长尺度内调控辐射光场的多种电磁特性, 具有调控效率高、自由度大、功能多样、易于集成等诸多优点, 相关研究也得到了越来越多的关注。针对这一研究领域, 本文将首先介绍片上局域近场光的远场辐射基本原理, 接着从远场辐射调控方式和功能出发, 介绍近年来研究人员在表面波的复杂远场辐射波前调控、多功能复用远场辐射调控、多物理参量远场辐射调控等方面的研究进展, 最后对该领域面临的挑战进行简单总结。

2 表面波远场辐射调控的基本原理

片上光场是一种能量局域在亚波长尺度内的表面波模式, 特点是其水平传播波矢 k_{sw} 大于远场传输光波矢 k_0 , 由于波矢失配使得近场表面波无法与远场传输波进行耦合。我们知道, 虽然二维平面上的表面波遇到非连续界面或者杂质时, 由于散射效应部分能量将会辐射到自由空间中去, 但是这种远场辐射场强度和方向往往都难以控制^[15-17]。

为了精准补偿表面波与辐射场之间的波矢失配, 从而实现可以自由控制的表面波远场辐射, 人们前期主要是利用衍射光栅的倒格矢进行波矢补偿。如图1(a)所示, 当表面波入射到光栅区域时, 会获得反向倒格矢的作用使得水平波矢减少, 从而实现表面波的远场定向辐射效应, 该过程中满足波矢守恒方程:

$$k_0 \sin \theta_r = k_{sw} + m \frac{2\pi}{\Lambda}, \quad (1)$$

其中: k_{sw} 是表面波的本征波矢, k_0 为光在自由空间的总波矢, m 表示衍射级次, Λ 表示光栅的周期。根据式(1)可知, 对于表面波的某一阶衍射模式(如 $m = -1$)而言, 可以通过调节光栅周期 Λ 来实现对表面波辐射角度 θ_r 的控制, 另外需要注意的是, 由于 m 也可以取其他整数, 光栅将表面波解耦合到远场过程中, 有可能会同时辐射出多个衍射模式, 因此该方法

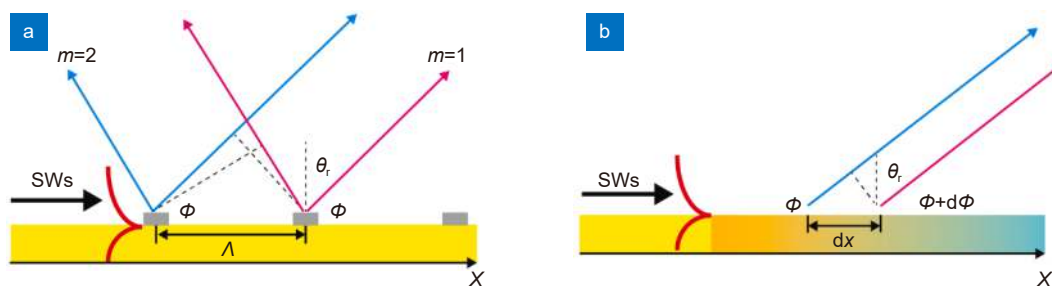


图 1 不同的表面波远场辐射调控原理^[18]。(a) 光栅耦合器; (b) 梯度相位超表面

Fig. 1 Different principles for far-field radiation manipulations of surface wave^[18]. (a) Grating couplers; (b) Gradient phase metasurfaces

存在多模式、效率低、功能受限等问题。

不同于光栅衍射法,近年来本团队提出了利用超表面实现表面波的辐射远场调控的新方法,采用的原理是通过亚波长人工单元来构造近似连续的界面相位分布,通过相位梯度补偿前面提到的波矢失配^[18]。如图 1(b) 所示,假设沿着 x 轴正向传播的表面波被定向解耦合到 θ_r 方向上,如果分析任意两个相邻为 dx 的光路,其中红色这段光路将积累表面波的传输相位 $k_{SW}dx$,蓝色这段光路将积累传输波相位 $k_0 dx \sin \theta_r$,另外这两段光路还会分别获得人工原子所提供的突变相位 Φ 与 $\Phi+d\Phi$,根据费马原理可得关系式 $k_0 \sin \theta_r dx + \Phi = k_{SW}dx + \Phi + d\Phi$,整理可得到基于梯度相位超表面实现表面波定向远场辐射过程中所需满足的波矢守恒方程:

$$k_0 \sin \theta_r = k_{SW} + \xi, \quad (2)$$

其中: $\xi = d\Phi/dx$, 表示相位梯度。从式 (2) 可知,只要调节超表面的相位梯度 ξ ,其方向与表面波波矢相反,就可以实现任意角度的远场辐射,并且产生的远场辐射模式是单一的。

除了基于一维相位梯度调制实现表面波的定向辐射外,我们还可以采用相同的原理设计二维相位梯度,基于惠更斯原理控制二维平面上每个局域位置处的亚波长人工微结构的辐射相位,最终实现任意复杂的辐射光场调控。此外,通过调控人工微结构单元的几何尺寸、取向角度、空间位置等自由度,并引入改变表面波入射方向等手段,还能进一步实现多功能、全参量的表面波辐射光场调控功能,相关内容将在后续章节中详细介绍。

3 表面波的远场辐射波前调控

本节将介绍各种表面波远场辐射调控方面的研究成果,相关进展推动了光学系统朝着片上化、集成化、

多功能化的方向发展,为众多纳米光子学相关应用带来新的启发。

3.1 表面波的定向辐射调控

2002 年, Ebbesen 课题组提出了如图 2(a) 所示的“Bull’s eye”结构^[19],利用它把金属纳米孔洞异常透射光场的发散角度收窄到了大概 $\pm 3^\circ$ 内,实现了对小孔中所激发表面等离子激元的远场辐射的定向化控制。这种“Bull’s eye”周期性结构尺度在波长级别,这使得研究人员拥有了在微纳尺度内定量调控近场光辐射特性的能力。利用类似结构,研究者们实现了纳米激光器辐射场^[20]以及量子点荧光^[21]的定向控制。这种现象究其原因并不复杂,例如所谓的“Bull’s eye”结构实际上就是一种环形金属光栅,光入射到纳米孔洞内所激发出的表面等离子激元在光栅区域传播时,其大部分能量就会因为光栅所提供的倒格矢作用被逐渐散射到某一阶远场衍射通道,从而实现近场光的定向性辐射传播^[22]。这种均匀型光栅结构提供的倒格矢是固定的,因此表面波受其衍射作用辐射的波束近似是一种简单的平面波。通过进一步引入周期渐变的光栅结构,从而调控局域位置处的衍射角, Kim 等人实现了如图 2(b) 所示的表面等离子激元的远场辐射聚焦效应^[23]。之后, Tang 等人还通过调整金属狭缝光栅的狭缝位置给一阶衍射通道引入迂回相位,从而使得其一阶衍射模式的初始相位满足一些特殊光束所需的相位分布,实现了艾里光束辐射^[24](如图 2(c) 所示)。其他一些研究人员也通过类似的方法实现了双聚焦辐射等效^[25-28]。

正如前文所述,基于传统光栅方法的表面波远场辐射调控器件存在多阶衍射模式、自由度受限等问题。2012 年,复旦大学周磊课题组开创性地提出了一种梯度超表面概念,利用渐变尺寸的亚波长 H 型金属人工单元所提供的共振型相位梯度,解决了自由空间

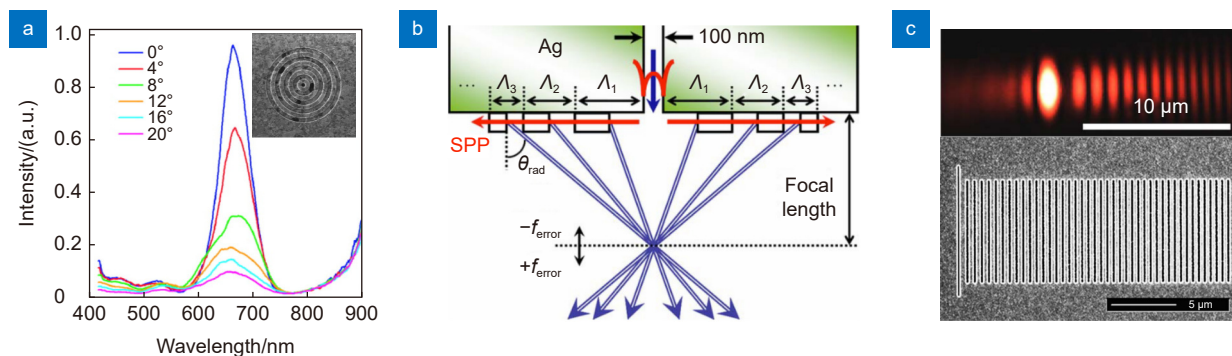


图 2 光栅耦合器实现表面波的远场定向辐射。(a) “Bull's eye”光栅实现异常透射光的定向辐射^[19];
(b) 表面光栅实现远场聚焦^[23]; (c) 金属狭缝光栅实现艾里光束辐射^[24]

Fig. 2 Far-field directional radiation of surface wave by grating coupler. (a) Directional radiation of the extraordinary optical transmission light by the "Bull's eye" grating^[19]; (b) Far-field focusing of the surface wave via surface grating^[23]; (c) Airy-beam radiation via metal-slit grating^[24]

光与本征表面波之间的波矢失配问题, 实现了自由空间光到表面波的高效转化^[29]。受该工作的启发, 研究人员尝试实现了传输波到表面波转化的逆向过程, 如图 3(a) 所示, Xu 等人基于类似的结构, 为微波传输线波导中的人工等离激元模式提供逆向波矢补偿, 从而实现了局域近场模式到辐射传输波模式的转化^[30], 其辐射效率相对于传统的漏波天线器件有了很大提高。之后, 其他研究人员通过优化超表面的人工单元参数, 实现了 10.4~24.5 GHz 宽波段范围内的高效表面波定向辐射^[31]。如图 3(b) 所示, Wang 等人巧妙地利用一个透射式超表面悬浮在表面波波导之上, 减弱了反射式超表面结构本身对表面波散射强度的巨大影响, 从而能够有效地抑制辐射旁瓣, 在 9~10.5 GHz 的范围内实现了高效的表面波定向远场辐射^[32]。在光频段, Zhu 等人则通过“金属-介质-金属 (MIM)”构型的共振相位超表面验证了表面等离激元的定向辐射概念^[33]。

当然, 类似的概念也可以拓展至介质波导体系, 由于介质波导中的表面波模式相对于金属中的等离激元模式传播损耗更小, 因此这种体系在表面波的远场辐射调控中具有天然优势。最近, Guo 等人提出了可以在介质波导上加工共振相位超表面来实现波导模式向空间辐射^[34]。如图 3(c) 所示, 他们也设计了一个 MIM 构型的人工单元, 这种结构上下层金属的存在使得他们所支持的共振模式与波导 TE_{00} 模式更容易产生耦合作用, 从而提高了单元的远场辐射效率, 利用这种结构他们实现了近红外波段的辐射光场聚焦等波前操控。

3.2 表面波的复杂辐射波前调控

一维光栅或者一维梯度相位超表面只能实现表面

波到传输波的定向辐射、线聚焦等简单的波前操控, 这显然无法满足光子芯片对多功能复杂远场波前调控的巨大需求。早期人们多是基于全息成像原理^[35], 通过计算得到的近表面波与目标远场在片上干涉形成光场的相位和振幅分布来设计全息光栅^[36-40], 因此当表面波照射到这种光栅上时, 就能够被辐射到远场, 并重构成目标场分布。Dolev 等人就利用如图 4(a) 所示的全息光栅, 实现了表面等离激元到远场艾里光斑和涡旋光束的辐射^[41]。需要注意的是, 这些工作仍然是基于衍射原理实现对表面波辐射光场的调控, 因此存在多阶衍射等问题, 远场波前调控的自由度和空间分辨率往往也会受到限制。

最近, 人们提出了利用超表面实现复杂远场波前调控的新思路。由于二维超表面是由亚波长人工单元结构排列组合而成, 因此通过精准调控局域位置处人工单元的几何参数, 就使得超表面具备了在亚波长尺度下精确调控表面波辐射场性质的能力。如图 4(b) 所示, Ding 等人将 MIM 构型的单元结构在一个介质宽波导上组成二维周期性阵列, 设计单元结构的尺寸, 引入二维非均匀共振相位分布, 从而把局域波导模式解耦合到自由空间传输波模式, 并实现了远场聚焦、全息成像等功能^[42]。值得注意的是, 由于表面波在二维体系传输过程中是被逐渐解耦合到自由空间的, 因此表面波的强度会越来越弱, 所以不同位置处的人工单元结构感受到的人射场强度也会逐渐下降, 这就在不同程度上影响了辐射场强的均匀性等性质。其中, 对于利用共振相位原理设计构造的超表面来说, 由于阻抗变化较大导致表面波解耦合速度往往很快, 因此可以用于构建辐射场的超表面的有效空间区域非常有

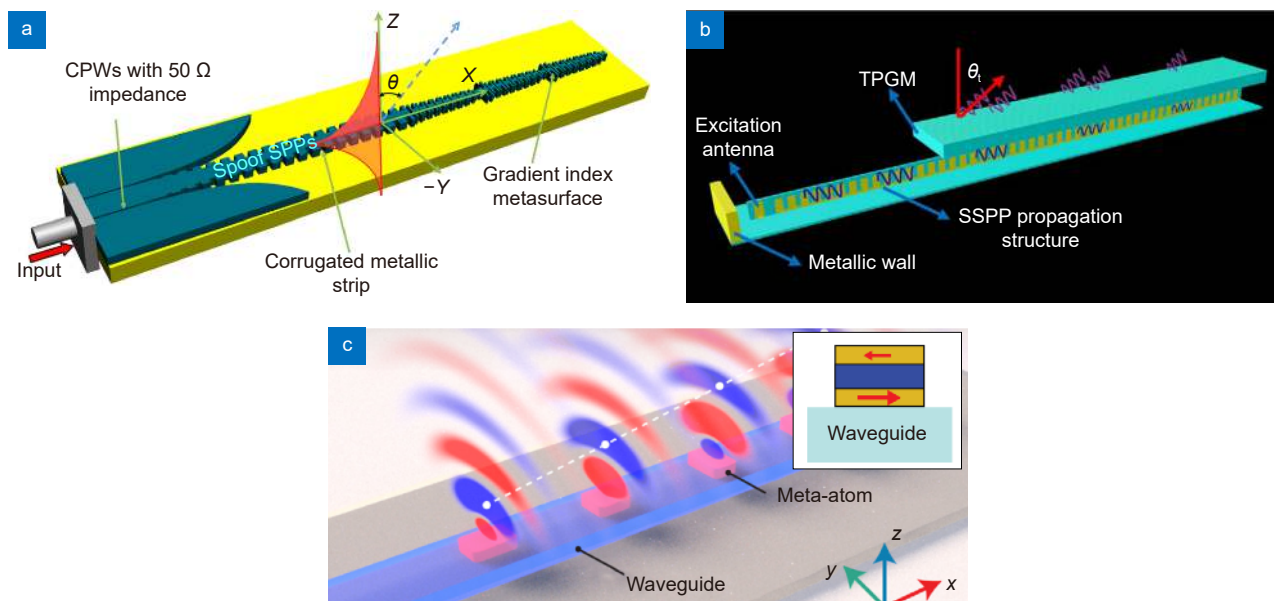


图3 超表面实现表面波的定向远场辐射。

- (a) 微波人工表面等离激元模式的定向辐射^[30];
 (b) 基于透射式超表面实现微波段的人工表面等离激元模式的定向辐射^[32];
 (c) 近红外频段介质波导模式的定向辐射^[34]

Fig. 3 Far-field directional radiation of surface wave by metasurface. (a) Directional radiation of microwave spool surface plasmon mode^[30];
 (b) Directional radiation of microwave spool surface plasmon mode based on a transmissive metasurface^[32];
 (c) Directional radiation of near infrared dielectric waveguide mode^[34]

限, 这极大限制了构建复杂光场的能力; 另外共振相位对于波长是非常敏感的, 因此其工作频率带宽一般较窄。

本团队提出了一种基于几何相位超表面来调控表面波远场辐射的方法^[18]。如图4(c)所示, 通过精心设计亚波长超表面单元旋转角从而设计几何相位梯度, 可以实现近场表面波到远场传输波的任意辐射波前调控, 并且其辐射场为特定圆偏振态, 其手性可以通过调控的单元的旋转顺序来自由控制; 特别是, 通过调控单元的偏振转化效率 (polarization conversion ratio, PCR), 可以对表面波辐射强度进行大范围调控, 从而获得对辐射振幅和相位的协同调控能力, 实现表面波的定向远场辐射、远场聚焦、涡旋光激发以及全息成像等效应。另外, Fang 等人提出利用硅柱作为基本单元加工在铌酸锂波导上, 通过控制单元旋转角引入二维几何相位梯度分布, 实现了波导模式到自由空间光模式的辐射, 并展示了全息成像等波前调控功能 (如图4(d)所示)^[43]。由于这种几何相位单元结构是被制备在波导表面上, 而波导模式的光场主要局域在体系内部, 因而两者之间相互作用微弱, 波导模式的辐射场强度普遍较弱, 但是辐射场的强度也较为均匀;

从另一角度来看, 波导中的光场能量可以传播到更远的距离, 在一个波导上能够串联多个超表面, 实现多种独立的远场辐射功能。另外, Xi 等人验证了这种几何相位超表面在太赫兹频段对波导模式辐射调控的效果, 并实现了一维与二维的艾里光束生成^[44]。与共振型相位不同, 几何相位只与单元结构的旋转角相关^[45], 不仅具有不随频率变化的鲁棒性, 保证了体系的宽频响应能力, 而且通过调控超表面单元的 PCR, 控制局域位置处辐射场的强度, 从而获得更为强大的辐射光场调控能力。

3.3 表面波的多功能复用辐射光场调控

片上光子芯片能够同时实现多种光场调控功能, 更好地满足集成光学应用的需求。我们知道, 对于以远场光作为激励源的超构器件来说, 其相位响应往往与入射光的偏振、波长、入射角等诸多因素相关, 利用多重自由度可以实现多功能复用的光场调控^[46-50], 类似思想同样也可以拓展至以表面波为激发源的片上光学器件。

最近, Zhou 等人提出可以利用路径复用自由度调控介质波导体系远场辐射, 实现了从波导模式到远场涡旋光的多功能激发^[51]。如图5(a)所示, 将复合光

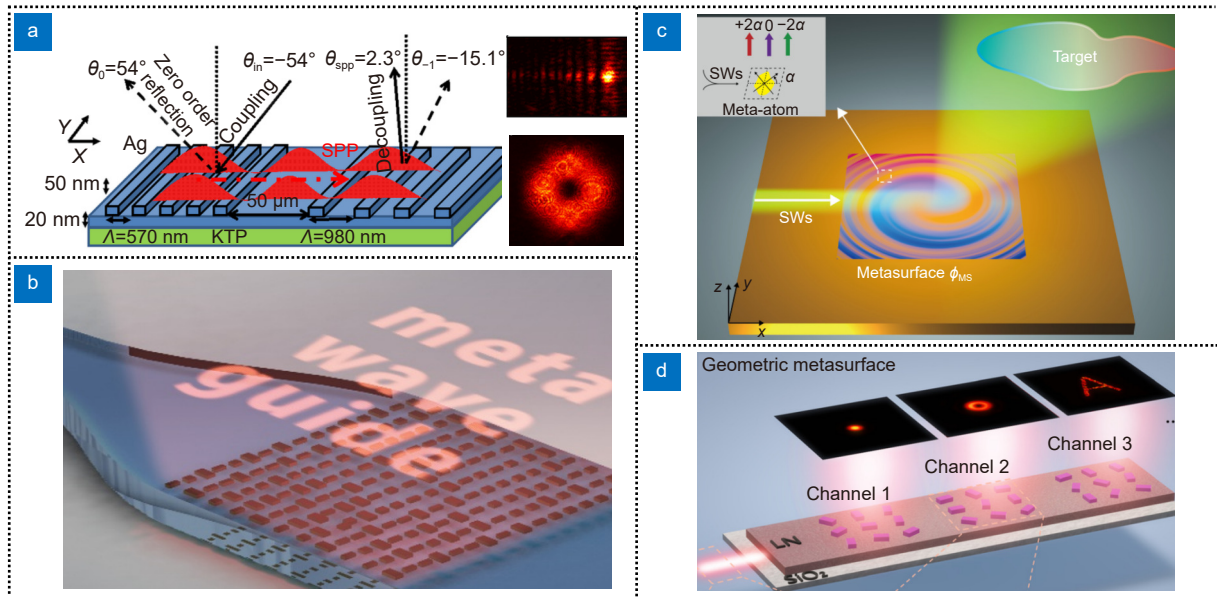


图 4 表面波的复杂远场波前调控。(a) 全息光栅实现表面等离子体激元激励下的艾里光束和涡旋光束激发^[41]；(b) 共振相位超表面实现介质波导模式的远场全息成像^[42]；(c) 几何相位超表面实现表面等离子体激元的复杂远场波前调控^[18]；(d) 串联型几何相位超表面实现铌酸锂波导模式的多功能远场全息^[43]

Fig. 4 Complex far-field wavefront manipulations of surface wave. (a) Holographic grating for Airy beam and vortex beam generation excited by surface plasmon^[41]; (b) Resonant phase metasurface for far-field holography of the dielectric waveguide mode^[42]; (c) Geometric phase metasurface for complex far-field wavefront control of surface plasmon^[18]; (d) Multifunctional far-field holography of lithium niobate waveguide mode by a series of geometric phase metasurfaces^[43]

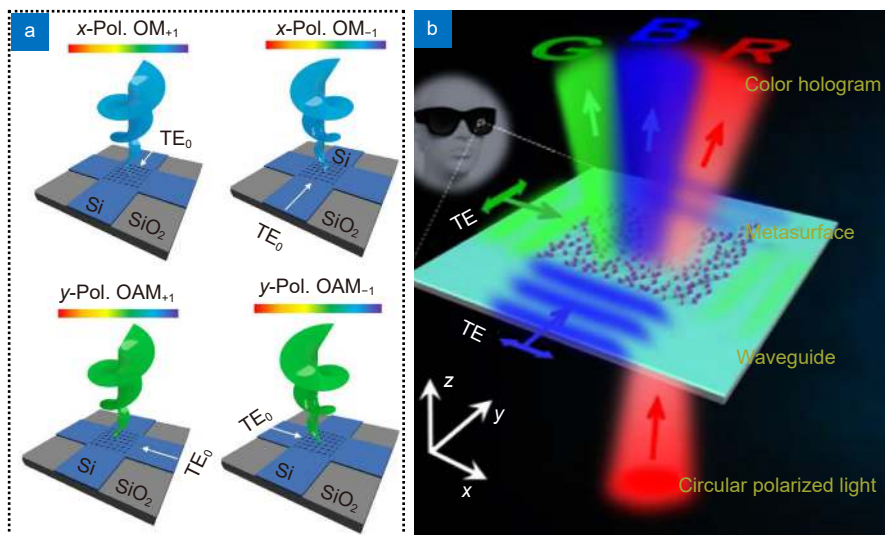


图 5 表面波的多功能复用远场辐射调控。(a) 基于二维复合光栅的路径复用双功能远场辐射调控^[51]；(b) 基于复合相位调控的多功能远场全息^[57]

Fig. 5 Multifunctional far-field manipulation of surface wave. (a) Optical path multiplexing dual-functional far-field radiation by two-dimensional composite grating^[51]; (b) Multifunctional far-field holography based on composite phase modulation^[57]

栅加工在两路正交传输波导的交界位置, 由于波导模式的辐射只对其传输方向上的光栅周期敏感, 所以可以对两路沿相互垂直方向传输的波导模式设计一种二维复合全息光栅, 分别调控不同方向传输的波导模式, 从而辐射出两种不同的涡旋光束。当然, 这种光栅对于两个相反方向入射的表面波来说功能是锁定的。为此, Ha 等人则提出利用单元的迂回相位结合粒子群优化的方法来设计超表面实现四功能的辐射全息成像, 打破了功能锁定这一限制^[52-53]。具体来说, 他们需要让超表面单元阵列在+X, -X两个相反方向入射的波导模式激发下产生两套独立的目标相位分布, 虽然这两种情况下, 每个单元产生的迂回相位具有绑定的关系(总和为 2π), 但是利用粒子群算法可以优化每个单元的迂回相位来使得它们在误差范围内与两套独立的目标相位近似吻合, 从而实现相反方向入射波导模式功能的近似解锁。通过在 X 与 Y 两个正交方向采用类似的调控思想, 就可以基于入射方向控制来激发四种不同远场聚焦或全息成像。此后, Yang 等人通过在迂回相位调控的基础上引入几何相位, 从而打破对称方向入射的波导模式的相位绑定, 实现了四个片上通道的独立辐射光场控制^[54]。这种路径多通道的复用的方法也可以用于不同波长的光, 从而实现多波长全息控制^[55-56]。如图 5(b) 所示, Shi 等人就通过独立控制单元的迂回相位和几何相位, 引入两个正交方向片上激发和一个远场入射激发共三种激励条件, 实现了三功能复用全息成像^[57]。此外, 还有研究人员提出可以通过改变环境折射率来实现辐射波前的动态控制^[58]; 或者通过在一个单元内引入双原子, 实现了近场图像与远场图像的独立双通道调控^[59]。

4 表面波的多参量辐射光场调控

前面章节介绍的工作, 往往是关注表面波的远场辐射波前调控信息, 采用的自由度主要是辐射场的相位分布, 有时还会引入对辐射振幅的调控, 往往忽略了光场的偏振特性。最近, 人们进一步实现了对表面波的远场辐射振幅、相位、偏振等的全参量调控, 提升了对辐射光场操控的自由度和能力, 这对高分辨率成像^[60-61]、光学通讯^[62]、光信息存储^[63]等应用来说具有重要意义。

研究人员提出利用干涉效应可以来调控表面波的辐射场偏振状态。我们知道, 任意偏振光都可以看成

两个正交偏振光(例如正交线偏振光或圆偏振光)的叠加, 它们的振幅与相位差共同决定了总光场的偏振态。如图 6(a) 所示, Li 等人采用类似的思想, 提出利用两路传播方向垂直的近场光干涉叠加的方法来产生具有特定偏振态的辐射光场^[64]。具体来说, 将两个沿垂直方向传播的表面等离子体模式的面内场分量看成两个正交的面内线偏振基模, 在干涉区域不同位置处两个正交模式积累的传播相位不同, 因此所合成出的近场光偏振态具有空间位置依赖特性。然后, 通过精心设计的纳米孔洞阵列将表面等离子体解耦合到远场并进行汇聚, 聚焦光场就可以具有预设的偏振状态。当然, 这一工作仍然是利用纳米孔洞阵列的布拉格衍射效应来实现表面波的远场辐射, 每个孔洞的局域辐射振幅难以进行有效控制, 特别是缺少了对辐射相位进行调控这一重要自由度。如图 6(b) 所示, 最近 Ji 等人通过在铌酸锂介质波导上加工几何相位介质超表面, 可以在 X 和 Y 两个垂直方向的波导模式的入射下分别产生两个自旋偏振与涡旋轨道角动量均相反的矢量涡旋光模式。他们进一步把这两个模式作为基模, 通过改变 X 与 Y 方向输入的信号光的强度和相位来调节所产生的两个矢量涡旋光基模的振幅和相位, 从而实现了高阶庞加莱球上任意一种矢量涡旋光模式的激发^[65]。

最近, 人们还提出了一种基于双人工微结构进行干涉的方法来实现辐射光场的偏振态调控^[66]。如图 6(c) 所示, 在波导模式的激励下, 两个相邻的人工微结构分别能辐射出一个左旋和右旋圆偏振光模式, 同时这两个不同偏振模式的相位分别被两个人工微结构各自的几何相位独立决定, 因而辐射光的偏振态可以通过改变两者的几何相位差进行调控。另外, Huang 等人设计了一种对称性打破的光子晶体平板, 通过控制结构的几何尺寸、空间转角等自由度, 实现了对局域位置的辐射光场振幅、相位以及偏振态的全参量调控, 实验验证了特定偏振全息成像及矢量聚焦光场等效应^[67](如图 6(d) 所示)。最近, Xu 等人也利用类似原理在微波段设计了一种漏波天线, 可以对表面波辐射场全参量进行调控, 实现了偏振独立可调的多波束辐射效应^[68]。

5 总结与展望

本文回顾了近年来近场表面波到远场传输波的辐

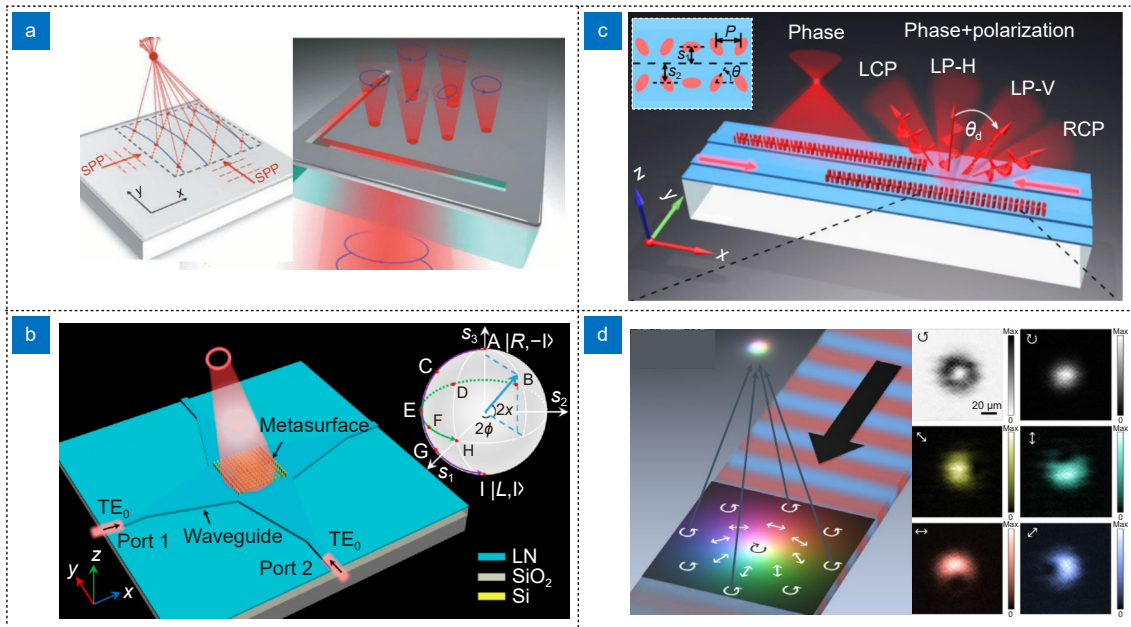


图 6 表面波远场矢量光场辐射调控。(a) 偏振态可调的辐射远场聚焦^[64]; (b) 任意矢量涡旋光束激发^[65]; (c) 辐射光场的偏振态调控^[66]; (d) 全参量可调的矢量光场辐射^[67]

Fig. 6 Far-field vectorial optical field manipulation of surface wave. (a) Far-field focusing of far-fields with controllable polarization state^[64]; (b) Arbitrary vectorial vortex beam generation^[65]; (c) Far-fields radiation with adjustable polarization^[66]; (d) Full-parameter controllable vectorial optical field radiation^[67]

射调控研究进展, 首先简要阐述了远场辐射调控的基本原理和实现方法, 随后回顾了基于衍射光栅以及梯度超表面实现表面波的定向辐射效应、远场聚焦、涡旋光场、全息图像等灵活多样的波前调控效应。另外, 基于表面波的多通道复用远场辐射调控以及全参量调控(包括相位、振幅、偏振等自由度)辐射远场调控也在本文中进行了简单总结。这些研究工作极大提高了人们对于近场表面波辐射操控的能力, 具有重要的科学意义和应用价值。

展望未来, 这一领域存在以下一些待解决的问题和可拓展的方向。首先, 表面波在二维体系传输过程中不可避免会存在吸收损耗, 这在不同程度上将影响表面波辐射远场的构建, 尤其是对基于金属基的表面等离子体体系而言, 这一问题更加严重。最近, 人们也提出了超表面调控介质基波导体系中波导模式的近场传输及远场辐射的方法, 其欧姆损耗效应得到了极大的抑制; 然而, 波导体系中引入的人工微结构单元的辐射效率相对较低, 这些问题会影响调控器件的工作效果, 需要在未来工作中进行改进。另外, 以往的超表面体系的远场辐射调控功能较为固定, 这是因为所采用的人工微结构单元通常是不可调控的, 这也是

被动式超表面体系所面临的共性问题。为此, 人们通过引入一些新的调控自由度, 包括电压、温度、光场等物理场来实现超表面对远场传输波的动态电磁调控功能, 接下来将这些自由度拓展引入到近场表面波的辐射远场波前动态调控中, 将具有重要的研究意义和应用价值。此外, 目前所实现的远场辐射调控还处在简单的功能验证阶段, 接下来可以考虑将这种远场辐射调控理论拓展至实际工程应用中, 包括漏波天线、激光雷达、微纳激光、虚拟/增强现实 (VR/AR) 等领域, 实现从前沿物理概念到真实应用场景的跨越。最后, 本文所回顾的工作主要是基于超表面实现表面波到远场的辐射, 相关概念具有极大的广义性和拓展性, 还可以基于超表面表面波调控实现更加丰富的调控效应, 包括特殊光束激发、超分辨光刻、面内传输控制等^[69-72], 这对操控片上光与物质相互作用等相关科学及应用具有重要意义, 也是未来的研究重点方向。

利益冲突: 所有作者声明无利益冲突

参考文献

[1] Atabaki A H, Moazeni S, Pavanello F, et al. Integrating

- photonics with silicon nanoelectronics for the next generation of systems on a chip[J]. *Nature*, 2018, **556**(7701): 349–354.
- [2] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface Plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 824–830.
- [3] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, et al. Extremely low frequency Plasmons in metallic Mesostructures[J]. *Phys Rev Lett*, 1996, **76**(25): 4773–4776.
- [4] Shi J J, Li Y, Kang M, et al. Efficient second harmonic generation in a hybrid plasmonic waveguide by mode interactions[J]. *Nano Lett*, 2019, **19**(6): 3838–3845.
- [5] Anker J N, Hall W P, Lyandres O, et al. Biosensing with plasmonic nanosensors[J]. *Nat Mater*, 2008, **7**(6): 442–453.
- [6] Zhang X, Liu Z W. Superlenses to overcome the diffraction limit[J]. *Nat Mater*, 2008, **7**(6): 435–441.
- [7] Zhang Y Q, Min C J, Dou X J, et al. Plasmonic tweezers: for nanoscale optical trapping and beyond[J]. *Light Sci Appl*, 2021, **10**(1): 59.
- [8] Chen J, Li T, Wang S M, et al. Multiplexed holograms by surface Plasmon propagation and polarized scattering[J]. *Nano Lett*, 2017, **17**(8): 5051–5055.
- [9] Sun J, Timurdogan E, Yaacobi A, et al. Large-scale nanophotonic phased array[J]. *Nature*, 2013, **493**(7431): 195–199.
- [10] Jackson D R, Caloz C, Itoh T. Leaky-wave antennas[J]. *Proc IEEE*, 2012, **100**(7): 2194–2206.
- [11] Monticone F, Alù A. Leaky-wave theory, techniques, and applications: from microwaves to visible frequencies[J]. *Proc IEEE*, 2015, **103**(5): 793–821.
- [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] Sun S L, He Q, Hao J M, et al. Electromagnetic metasurfaces: physics and applications[J]. *Adv Opt Photonics*, 2019, **11**(2): 380.
- [14] Meng Y, Chen Y Z, Lu L H, et al. Optical meta-waveguides for integrated photonics and beyond[J]. *Light Sci Appl*, 2021, **10**(1): 235.
- [15] Guan F X, Sun S L, Xiao S Y, et al. Scatterings from surface Plasmons to propagating waves at Plasmonic discontinuities[J]. *Sci Bull*, 2019, **64**(12): 802–807.
- [16] Guan F X, Sun S L, Ma S J, et al. Transmission/reflection behaviors of surface Plasmons at an interface between two Plasmonic systems[J]. *J Phys Condens Matter*, 2018, **30**(11): 114002.
- [17] Guan F X, Dong S H, He Q, et al. Scatterings and wavefront manipulations of surface Plasmon polaritons[J]. *Acta Phys Sin*, 2020, **69**(15): 157804.
- 管福鑫, 董少华, 何琼, 等. 表面等离极化激元的散射及波前调控[J]. *物理学报*, 2020, **69**(15): 157804.
- [18] Pan W K, Wang Z, Chen Y Z, et al. High-efficiency generation of far-field spin-polarized wavefronts via designer surface wave metasurfaces[J]. *Nanophotonics*, 2022, **11**(9): 2025–2036.
- [19] Lezec H J, Degiron A, Devaux E, et al. Beaming light from a subwavelength aperture[J]. *Science*, 2002, **297**(5582): 820–822.
- [20] Yu N F, Fan J, Wang Q J, et al. Small-divergence semiconductor lasers by plasmonic collimation[J]. *Nat Photonics*, 2008, **2**(9): 564–570.
- [21] Jun Y C, Huang K C Y, Brongersma M L. Plasmonic beaming and active control over fluorescent emission[J]. *Nat Commun*, 2011, **2**(1): 283.
- [22] Martín-Moreno L, García-Vidal F J, Lezec H J, et al. Theory of highly directional emission from a single subwavelength aperture surrounded by surface corrugations[J]. *Phys Rev Lett*, 2003, **90**(16): 167401.
- [23] Kim S, Lim Y, Kim H, et al. Optical beam focusing by a single subwavelength metal slit surrounded by chirped dielectric surface gratings[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, **92**(1): 013103.
- [24] Tang X M, Li L, Li T, et al. Converting surface Plasmon to spatial Airy beam by graded grating on metal surface[J]. *Opt Lett*, 2013, **38**(10): 1733–1735.
- [25] Hao F H, Wang R, Wang J. Design and characterization of a micron-focusing plasmonic device[J]. *Opt Express*, 2010, **18**(15): 15741–15746.
- [26] Guan C Y, Ding M, Shi J H, et al. Compact all-fiber plasmonic Airy-like beam generator[J]. *Opt Lett*, 2014, **39**(5): 1113–1116.
- [27] Shi H F, Du C L, Luo X G. Focal length modulation based on a metallic slit surrounded with grooves in curved depths[J]. *Appl Phys Lett*, 2007, **91**(9): 093111.
- [28] Kumar M S, Piao X, Koo S, et al. Out of plane mode conversion and manipulation of Surface Plasmon Polariton waves[J]. *Opt Express*, 2010, **18**(9): 8800–8805.
- [29] 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.
- [30] Xu J J, Zhang H C, Zhang Q, et al. Efficient conversion of surface-Plasmon-like modes to spatial radiated modes[J]. *Appl Phys Lett*, 2015, **106**(2): 021102.
- [31] Kianinejad A, Chen Z N, Qiu C W. A single-layered spoof-Plasmon-mode leaky wave antenna with consistent gain[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2017, **65**(2): 681–687.
- [32] Wang D P, Wang G M, Cai T, et al. Planar spoof surface Plasmon Polariton antenna by using transmissive phase gradient metasurface[J]. *Ann Phys*, 2020, **532**(6): 2000008.
- [33] Zhu H, Yin X, Chen L, et al. Directional beaming of light from a subwavelength metal slit with phase-gradient metasurfaces[J]. *Sci Rep*, 2017, **7**(1): 12098.
- [34] Guo X X, Ding Y M, Chen X, et al. Molding free-space light with guided wave-driven metasurfaces[J]. *Sci Adv*, 2020, **6**(29): eabb4142.
- [35] Li T, Chen J, Zhu S N. Manipulating surface Plasmon propagation: from beam modulation to near-field holography[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2017, **54**(5): 050002.
- 李涛, 陈绩, 祝世宁. 表面等离激元的传播操控: 从波束调制到近场全息[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, **54**(5): 050002.
- [36] Li M, Hagberg M, Bengtsson J, et al. Optical waveguide fan-out elements using dislocated gratings for both outcoupling and phase shifting[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1996, **8**(9): 1199–1201.
- [37] Chen Y H, Huang L, Gan L, et al. Wavefront shaping of infrared light through a subwavelength hole[J]. *Light Sci Appl*,

- 2012, **1**(8): e26.
- [38] Chen Y H, Fu J X, Li Z Y. Surface wave holography on designing subwavelength metallic structures[J]. *Opt Express*, 2011, **19**(24): 23908–23920.
- [39] Huang Z Q, Marks D L, Smith D R. Out-of-plane computer-generated multicolor waveguide holography[J]. *Optica*, 2019, **6**(2): 119–124.
- [40] Zheng S, Zhao Z Y, Zhang W F. Versatile generation and manipulation of phase-structured light beams using on-chip subwavelength holographic surface gratings[J]. *Nanophotonics*, 2023, **12**(1): 55–70.
- [41] Dolev I, Epstein I, Arie A. Surface-Plasmon holographic beam shaping[J]. *Phys Rev Lett*, 2012, **109**(20): 203903.
- [42] Ding Y M, Chen X, Duan Y, et al. Metasurface-dressed two-dimensional on-chip waveguide for free-space light field manipulation[J]. *ACS Photonics*, 2022, **9**(2): 398–404.
- [43] Fang B, Wang Z Z, Gao S L, et al. Manipulating guided wave radiation with integrated geometric metasurface[J]. *Nanophotonics*, 2022, **11**(9): 1923–1930.
- [44] Xi K L, Fang B, Ding L, et al. Terahertz airy beam generated by Pancharatnam-Berry phases in guided wave-driven metasurfaces[J]. *Opt Express*, 2022, **30**(10): 16699–16711.
- [45] Bomzon Z, Biener G, Kleiner V, et al. Space-variant Pancharatnam-Berry phase optical elements with computer-generated subwavelength gratings[J]. *Opt Lett*, 2002, **27**(13): 1141–1143.
- [46] Guo W L, Wang G M, Hou H S, et al. Multi-functional coding metasurface for dual-band independent electromagnetic wave control[J]. *Opt Express*, 2019, **27**(14): 19196–19211.
- [47] Chen S Q, Liu W W, Li Z C, et al. Metasurface - empowered optical multiplexing and multifunction[J]. *Adv Mater*, 2020, **32**(3): 1805912.
- [48] Zhang L, Wu R Y, Bai G D, et al. Transmission-reflection-integrated multifunctional coding metasurface for full-space controls of electromagnetic waves[J]. *Adv Funct Mater*, 2018, **28**(33): 1802205.
- [49] Wu P C, Zhu W M, Shen Z X, et al. Broadband wide-angle multifunctional polarization converter via liquid-metal-based metasurface[J]. *Adv Opt Mater*, 2017, **5**(7): 1600938.
- [50] Spägle C, Tamagnone M, Kazakov D, et al. Multifunctional wide-angle optics and lasing based on supercell metasurfaces[J]. *Nat Commun*, 2021, **12**(1): 3787.
- [51] Zhou N, Zheng S, Cao X P, et al. Ultra-compact broadband polarization diversity orbital angular momentum generator with $3.6 \times 3.6 \mu\text{m}^2$ footprint[J]. *Sci Adv*, 2019, **5**(5): eaau9593.
- [52] Ha Y L, Guo Y H, Pu M B, et al. Monolithic-integrated multiplexed devices based on metasurface-driven guided waves[J]. *Adv Theory Simul*, 2021, **4**(2): 2000239.
- [53] Ha Y L, Guo Y H, Pu M B, et al. Minimized two- and four-step varifocal lens based on silicon photonic integrated nanoapertures[J]. *Opt Express*, 2020, **28**(6): 7943–7952.
- [54] Yang R, Yu Q Q, Pan Y W, et al. Directional-multiplexing holography by on-chip metasurface[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(10): 220177.
- 杨睿, 于千茜, 潘一苇, 等. 基于片上超表面的多路方向复用全息术[J]. *光电工程*, 2022, **49**(10): 220177.
- [55] Liu Y, Shi Y Y, Wang Z J, et al. On-chip integrated metasystem with inverse-design wavelength Demultiplexing for augmented reality[J]. *ACS Photonics*, 2023, **10**(5): 1268–1274.
- [56] Fang B, Shu F Z, Wang Z Z, et al. On-chip non-uniform geometric metasurface for multi-channel wavefront manipulations[J]. *Opt Lett*, 2023, **48**(11): 3119–3122.
- [57] Shi Y Y, Wan C W, Dai C J, et al. Augmented reality enabled by on-chip meta-holography multiplexing[J]. *Laser Photonics Rev*, 2022, **16**(6): 2100638.
- [58] Yang R, Wan S, Shi Y Y, et al. Immersive tuning the guided waves for multifunctional on-chip metaoptics[J]. *Laser Photonics Rev*, 2022, **16**(8): 2200127.
- [59] Shi Y Y, Wan C W, Dai C J, et al. On-chip meta-optics for semi-transparent screen display in sync with AR projection[J]. *Optica*, 2022, **9**(6): 670–676.
- [60] Zhang C L, Min C J, Du L P, et al. Perfect optical vortex enhanced surface Plasmon excitation for plasmonic structured illumination microscopy imaging[J]. *Appl Phys Lett*, 2016, **108**(20): 201601.
- [61] Dorn R, Quabis S, Leuchs G. Sharper focus for a radially polarized light beam[J]. *Phys Rev Lett*, 2003, **91**(23): 233901.
- [62] D'Ambrosio V, Nagali E, Walborn S P, et al. Complete experimental toolbox for alignment-free quantum communication[J]. *Nat Commun*, 2012, **3**(1): 961.
- [63] Parigi V, D'Ambrosio V, Arnold C, et al. Storage and retrieval of vector beams of light in a multiple-degree-of-freedom quantum memory[J]. *Nat Commun*, 2015, **6**(1): 7706.
- [64] Li L, Li T, Tang X M, et al. Plasmonic polarization generator in well-routed beaming[J]. *Light Sci Appl*, 2015, **4**(9): e330.
- [65] Ji J T, Wang Z Z, Sun J C, et al. Metasurface-enabled on-chip manipulation of higher-order Poincaré sphere beams[J]. *Nano Lett*, 2023, **23**(7): 2750–2757.
- [66] Zhang Y B, Li Z C, Liu W W, et al. On-chip multidimensional manipulation of far-field radiation with guided wave-driven metasurfaces[J]. *Laser Photonics Rev*, 2023, **17**(9): 2300109.
- [67] Huang H Q, Overvig A C, Xu Y, et al. Leaky-wave metasurfaces for integrated photonics[J]. *Nat Nanotechnol*, 2023, **18**(6): 580–588.
- [68] Xu G Y, Overvig A, Kasahara Y, et al. Arbitrary aperture synthesis with nonlocal leaky-wave metasurface antennas[J]. *Nat Commun*, 2023, **14**(1): 4380.
- [69] Luo X G, Ishihara T. Surface Plasmon resonant interference nanolithography technique[J]. *Appl Phys Lett*, 2004, **84**(23): 4780–4782.
- [70] Guo Y H, Pu M B, Zhao Z Y, 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.
- [71] Guo Y H, Pu M B, Li X, et al. Chip-integrated geometric metasurface as a novel platform for directional coupling and polarization sorting by spin-orbit interaction[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2018, **24**(6): 4700107.
- [72] Pan W K, Wang Z, Chen Y Z, et al. Efficiently controlling near-field wavefronts via designer metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2023, **10**(7): 2423–2431.

作者简介



陈宜臻 (1996-), 男, 博士研究生, 主要从事表面等离激元与超表面领域的研究。

E-mail: Chenyz18@fudan.edu.cn



何琼 (1979-), 男, 博士, 教授, 研究领域为电磁特异介质、纳米光子学。

E-mail: Qionghe@fudan.edu.cn



潘威廉 (1994-), 男, 博士, 主要从事表面等离激元与超表面领域的研究。

E-mail: 19110720004@fudan.edu.cn



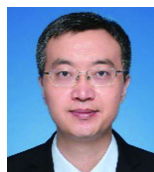
周磊 (1972-), 男, 博士, 教授, 研究领域为电磁特异介质、纳米光子学。

E-mail: phzhou@fudan.edu.cn



金相宇 (2000-), 男, 硕士研究生, 主要从事表面等离激元与超表面领域的研究。

E-mail: 22210720009@m.fudan.edu.cn



【通信作者】孙树林 (1980-), 男, 博士, 教授, 研究领域为超材料、超表面、纳米光子学等。

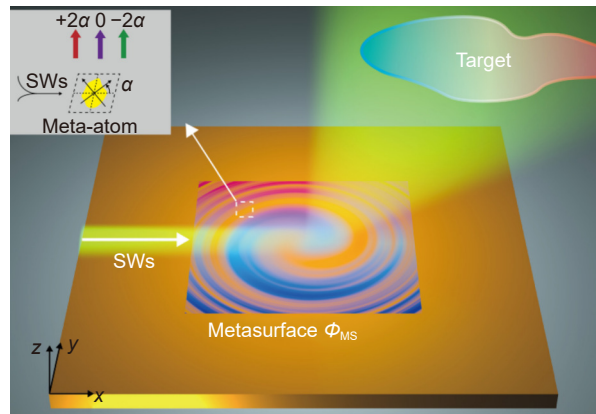
E-mail: sls@fudan.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Far-field radiation manipulations of on-chip optical near-fields

Chen Yizhen¹, Pan Weikang¹, Jin Xiangyu¹, He Qiong², Zhou Lei², Sun Shulin^{1*}



Schematics of the complex far-field wavefront control of surface waves

Overview: Surface waves (SWs), including surface plasmon polaritons (SPPs) and their equivalent counterparts such as spoof SPPs and guided SWs, are a kind of eigen electromagnetic modes localized at the surface of the metal or artificial structure. As the information or energy carrier, SWs can find numerous applications in integration-optics. On the other hand, achieving freely tailored far-field radiations from SWs has also attracted much attention from science and technology. However, due to the momentum mismatch issue between SWs and free-space propagating waves (PWs), a long-standing issue is to find appropriate approaches to efficiently link these different electromagnetic modes.

One early representative device for radiation control of SWs is the leaky wave antenna (LWA), which can help people realize the directional radiation and the beam scanning of microwave radar signals. The travelling waves inside a waveguide of the LWA can be gradually radiated to the desired direction after suffering from some periodic Bragg modulations. Besides, people have also proposed to fabricate periodic textures surrounding a small aperture in a metal film to collimate the transmission light beam emerges from the aperture. Based on a similar concept, more intriguing effects of SW-PW radiation are also achieved, including far-field focusing, Airy beam, vortex beam generation, and so on. However, these Bragg devices still suffer from the issues of low efficiency, large size, and lack of degrees of freedom.

Recently, the two-dimensional metasurfaces, i.e., a kind of ultrathin metamaterial constructed by planar meta-atoms with the predetermined electromagnetic wave properties, have been proposed as the high-efficiency, high-integration, and multi-function platforms for freely modulating the near- to far- field radiations. Excited by the impinging SWs, a series of carefully designed meta-atoms can serve as the sub-sources and radiate the far-field PWs with freely tailored amplitudes, phases, as well as polarizations. Based on the interference effect, such metasurfaces can thus construct the arbitrary scattering far-field patterns in deep subwavelength scale, including the directional far-field radiation, focusing, holograms, vortex/vectorial beam generations, and so on. Moreover, new degrees of freedom, such as the incident directions of SWs and the far-field polarizations of radiated PWs, can be further utilized to implement more functionalities in the single meta-device. Such meta-devices, featured by mini-size, easy-integration, and high-performance, are highly desired in future integration-optics applications, e.g., leaky antenna, virtual reality imaging, and micro projector.

Chen Y Z, Pan W K, Jin X Y, et al. Far-field radiation manipulations of on-chip optical near-fields[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(8): 230173; DOI: [10.12086/oe.2023.230173](https://doi.org/10.12086/oe.2023.230173)

Foundation item: Project supported by National Key Research and Development Program of China (2020YFA0710100, 2022YFA1404700), National Natural Science Foundation of China (12221004, 62192771, 62005197), and Shanghai Science and Technology Committee (20JC1414601)

¹Shanghai Engineering Research Centre of Ultra Precision Optical Manufacturing, School of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China; ²State Key Laboratory of Surface Physics and Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China

* E-mail: sls@fudan.edu.cn