

基于介质超表面的片上集成纳米光子器件

廖琨, 甘天奕, 胡小永*, 龚旗煌

北京大学物理学院人工微结构和介观物理国家重点实验室, 北京 100871

摘要 超表面可被设计应用于波前的空间变换, 二维周期性光学超表面结构的研究主要集中于调控光在自由空间中传播的波前。为了操控片上光信号传输的自由度, 实现小尺寸、宽带以及低损耗的片上集成光子计算芯片, 发展了一系列一维片上超表面的设计工作。对近几年来基于介质超表面的片上集成纳米光子器件的相关工作进行综述, 从片上超表面的物理机制、片上超表面的实现方法以及片上超表面在集成纳米光子器件中的应用几方面出发进行了回顾和讨论。同时也对潜在的挑战进行了总结, 对片上超表面在集成纳米光子器件中的进一步应用研究进行了展望。

关键词 光学器件; 一维超表面; 相位调控; 纳米光子器件

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0823001

On-Chip Nanophotonic Devices Based on Dielectric Metasurfaces

Liao Kun, Gan Tianyi, Hu Xiaoyong*, Gong Qihuang

State Key Laboratory of Artificial Microstructure and Mesoscopic Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract Metasurfaces can be designed for the spatial transformation of wavefronts. Research on the two-dimensional periodic optical metasurfaces mainly focuses on controlling the wavefront of light propagating in free space. In recent years, researchers have designed a series of one-dimensional on-chip metasurfaces to control the degree of freedom in on-chip optical signal transmission and further realize a small-size, broadband, and low-loss integrated photonic computing chip. This article summarized the related work on on-chip nanophotonic devices based on dielectric metasurfaces. To be specific, we reviewed and discussed the physical mechanisms, implementation methods, and applications of on-chip metasurfaces in integrated nanophotonic devices. Besides, we undertook a general review of the remaining challenges and proposed possible development directions that require further study for the application of on-chip metasurfaces to integrated nanophotonic devices.

Key words optical devices; one-dimensional metasurfaces; phase control; nanophotonic devices

OCIS codes 230.3120; 140.4780; 160.3380

1 引言

光学超表面作为人为设计的电磁界面^[1-3], 可以控制和操纵光的许多基本特性, 如振幅^[4]、相位^[5]和偏振^[6-7]等。它由亚波长的光学天线阵列组成, 这些天线与入射的电磁场发生共振^[8]。以往大家的研究重点是探究利用二维周期超表面控制光在自由空间

中传播的物理机制和功能应用^[9-13]。随着工程计算、数据分析和云计算的快速发展^[11], 对超高速和节能计算的需求呈指数级增长, 对具有超快时间响应、超低能耗的片上集成全光信号处理芯片进行深入研究具有十分重要的意义^[14-17]。光子集成回路为光信息处理提供了一个有吸引力的平台^[18-20], 然而, 可靠的大规模系统集成面临较大的挑战, 包括缩小

收稿日期: 2020-09-16; 修回日期: 2020-10-11; 录用日期: 2020-10-21

基金项目: 国家重点研发项目(2018YFB2200403)、国家自然科学基金(61775003, 11734001, 91950204, 11527901)、北京市科技计划课题(Z191100007219001)

* E-mail: xiaoyonghu@pku.edu.cn

器件尺寸^[21]、增加器件工作带宽^[22]、提高稳定性^[22]，以及减少器件插入损耗^[21]。片上超表面的出现结合了光子学和电子学的优点，打破了衍射极限^[23-28]，通过将光场压缩至亚波长尺度来研究光与物质相互作用^[29-30]。因此，近几年，逐渐发展了片上超表面的设计研究工作，以操控片上光信号传输的自由度，进而实现小尺寸、宽带以及低损耗的片上集成光子计算芯片^[31-34]。到目前为止，已经发表了许多关于片上超表面的工作，但还没有相关的文献来全面概述片上超表面在片上集成光子器件应用方面的物理机制、实现方法、研究现状以及发展趋势。本文旨在提供一个通用的框架来介绍这个迅速发展的领域，以促进对基于超表面的片上集成纳米光子器件的进一步研究。

本文综述了近年来片上超表面的物理机制、实现方法以及片上超表面在集成纳米光子器件应用中的最新进展。首先对片上超表面的基本物理机制进行了详细的总结，包括相位梯度调控、相位匹配、表面等离子激元与波导模式耦合以及模式转换。这些基本机制为后续的结构设计和功能应用奠定了物理基

础。之后讨论了片上超表面的实现方法，包括基于有效介质理论、传输矩阵模型以及反向设计等设计方案的构型。此外，介绍了片上超表面在集成纳米光子器件中的应用，包括模式/波长分束器、片上耦合器、模式转换器、波前调制器以及片上非对称传播等。最后，讨论了基于片上超表面在集成纳米光子器件所面临的挑战和发展趋势，并展望了这个方向的未来发展前景。

2 片上超表面的物理机制

本部分介绍超表面设计中涉及到的主要物理机制，包括：1) 波导传输中利用附加散射或者共振结构进行相位梯度调控^[35-38]；2) 通过超表面引入额外相位差实现相位匹配^[39-41]；3) 将介质波导与金属天线的表面等离子激元结合，利用等离子激元的洛伦兹线型共振调控波导的传播模式^[42-47]；4) 波导模式之间通过超表面进行转换^[48-52]。

2.1 相位梯度调控

在光波导上放置连续的散射体将给波导传输模式引入附加相位，如图1(a)和图1(b)所示。当入射

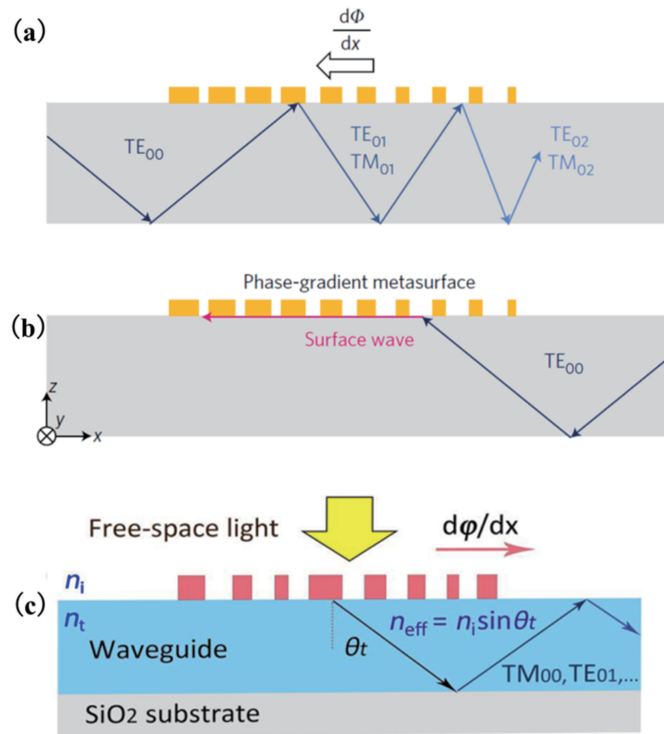


图 1 相位梯度调控与相位匹配原理示意图。(a)光传播方向与相位梯度方向相反^[36]；(b)光传播方向与相位梯度方向相同^[36]；(c)利用相位匹配将自由光场耦合为波导传播模式^[40]

Fig. 1 Schematic diagrams of phase gradient control and phase matching. (a) Direction of light propagation is opposite to that of phase gradient^[36]；(b) direction of light propagation is the same as that of phase gradient^[36]；(c) coupling free light field into waveguide propagation mode by phase matching^[40]

波导模式与附带相位梯度方向反向传播时,其波矢量的倾斜角增大,与从低阶到高阶波导模式的耦合相对应;反之,当入射波导模式沿附带相位梯度方向传播时,高阶波导模式转换为低阶模式。调控散射体形状与位置,可以调控附带相位梯度,实现不同波导模式间的转化^[35],或者实现波导的非对称传播^[36]。同时,由于梯度调控超表面是通过连续散射体控制波导,散射体对波导模式具有集体作用,故在仅为几倍波长的传播距离内,可以传递比波导传输相位梯度大很多倍的有效波矢量至入射模式,导致传输波矢发生较大变化^[37]。由于器件尺寸与工作带宽呈反比关系,这种梯度调控超表面对波导的集体效应可以在较小的区域内实现对光的调控,制作的器件一般具有工作带宽大的优点^[38]。

2.2 相位匹配

一般而言,在介质波导中的不同传输模式,有效折射率不同,则不同传输模式的波矢之间或者波导模式波矢与空间中自由传播的光场波矢之间均不相等。在传输相同距离之后,两种模式之间产生相位差,此相位差不利于两种模式之间的转换,降低了耦合效率或转化效率。因此需要额外的结构补偿此相位差,可使两种模式相位在一定范围内保持一致,以获得较高的耦合或转化效率。传统的耦合方法一般是利用棱镜的隐失波场补偿波矢,或者利用表面周期性光栅结构引入额外相位进行补偿,存在耦合效率较低或者只能耦合单一波长与固定偏振方向的问题。如图 1(c)所示,利用片上超表面结构,可以更精确地调控各处相位,实现任意偏振态向波导模式的耦合^[39-40]。并且可以通过补偿相位差,实现任意偏振方向的硅波导模式向光子晶体波导模式的转

化^[41]。片上超表面可以更加精确地实现相位匹配,使新一代的高效多波长耦合器与多模式波导模转换器的实现成为可能。

2.3 表面等离子激元与波导模式耦合

表面等离子激元可以将电磁场限制在非常小的体积内,通过光场和金属中自由电子的联合共振积累能量^[42-44]。如果能够在集成介质光子回路中有效地激发表面等离子体纳米天线,那么它的激发特性可以有更为广泛的应用。想要应用金属与介质波导的杂化结构,必须准确了解表面等离子激元与波导的相互作用。因此,首先需要量化表面等离子激元与波导模式耦合的情况^[45-46]。图 2(a)和图 2(b)给出在一维介质氮化硅波导上放置金属天线阵列的结构示意图^[47]。针对由平面波导或一维波导组成的介电系统,需分两步来了解系统的耦合过程。首先, N 个粒子间的诱导偶极矩为

$$P_n = \alpha [E_{in}(r_n) + \sum_{m \neq n} G(r_m, r_n) P_m], \quad (1)$$

式中:驱动场 $E_{in}(r_n)$ 不考虑金属天线问题的解;波导系统的格林函数 $G(r_m, r_n)$ 量化了波导、衬底以及空气层间的相互作用; r 为位置矢量; m 和 n 为不同粒子; α 为极化率。接着通过金属天线单元的相干叠加来表征系统的物理特性,表达式为

$$E(r) = \sum_n G(r, r_n) P_n. \quad (2)$$

线性叠加原理意味着金属天线阵列和波导的耦合结果是由单元天线(形状因子)乘以结构因子(取决于不同金属天线单元放置的位置)来决定的。因此,光场可以通过调控单个天线在不同通道之间的干涉增强进入波导的辐射以及抑制进入衬底和空气的辐射。从上述分析可以看到,波导模式将与等离

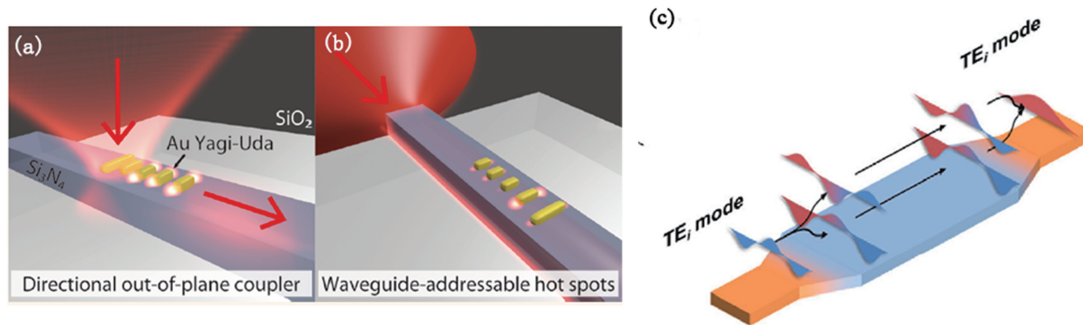


图 2 表面等离子激元与模式转换器器件结构示意图。(a)(b)一维介质氮化硅波导上的金属天线阵列结构示意图^[47];
(c)波导模式转换器原理示意图^[52]

Fig. 2 Schematic diagrams of devices using surface plasmon and mode converter. (a) (b) Structure diagrams of metal antenna array on one dimensional dielectric silicon nitride waveguide^[47]; (c) schematic diagram of waveguide mode converter^[52]

激元模式耦合产生附加相位,扩大了相位调节范围。

2.4 模式转换

片上模式转换器在多模光子学中起着非常重要的作用,在许多应用中受到了广泛的关注。实现模式转换器的关键是获得最佳耦合系数和所需的相移。然而,如何在超宽的带宽内实现高性能紧凑型模式转换器仍然是一个非常具有挑战性的课题^[49-51]。

这里介绍一种利用全介质超表面波导支持灵活的片上多模操作来实现模式转换器的通用方法^[52]。采用混合模式接口方法可实现 TE_0 - TM_0 偏振旋转器和 TE_1 - TM_0 偏振模式转换器。这里将该方法推广到具有高阶模式的片上多模式操作,即模式交换。图 2(c)显示了通过使用由输入多模部分(IMS)、模式激励部分(MES)、相移部分(PSS)、模式合成部分(MSS)和输出多模部分(OMS)组成的结构来实现模式交换的一般原理^[48]。对于模式交换器,从 IMS 启动两种导模,这两种导模通过专门设计的 MES 后,分别以不同的复模态激励系数激励 PSS 中支撑的超模,最终转化为目标模式由 OMS 输出,实现目标的模式转换。

3 片上超表面的设计方法

目前有多种设计片上超表面的方法,主要分为:

1)利用有效介质理论简化超表面结构,将结构尺寸设计转化为几何光学中的折射率分布以及利用几何

光学结论解决尺寸设计等;2)使用传输矩阵描述光学模式传播,将超表面结构与传输矩阵元联系,通过优化传输矩阵来优化结构,或者通过目标传输矩阵来搜寻所需要的结构尺寸;3)使用反向设计,利用优化目标在预定参数空间中搜索最优解,之后评估最优解对应的超表面结构性能好坏。利用这些设计方法,可以设计出多种超表面功能结构。

3.1 有效介质理论

利用金属的局域等离子体共振^[45],或者利用刻槽结构构造新的传输结构^[53]。相比于无结构的波导传输,可以获得特定的相位延迟。这些效应可以统一地用有效介质理论来描述,即在存在这些效应的区域,使用有效折射率来替代原有的折射率,唯象地描述产生的相位延迟。利用有效折射率理论时,首先需要通过模拟计算或实验测量,得到关于相位延迟与超表面结构几何尺寸的关系,计算出结构对应的有效折射率。之后就可以使用几何光学的手段,直接计算等效折射率区域的形状与尺寸,即超表面结构的尺寸,以达到目标波前重构的结果。

以片上超表面透镜为例进行阐述^[46]。利用硅波导上长方形金属局域等离子体共振带来的洛伦兹线型来产生相位延迟。首先通过模拟计算,得到在固定宽度、高度及光栅周期下,不同长度的长方体带来的相位延迟曲线,并计算出对应的等效折射率曲线,如图 3(a)所示。之后选取所需的实验波长,计算出

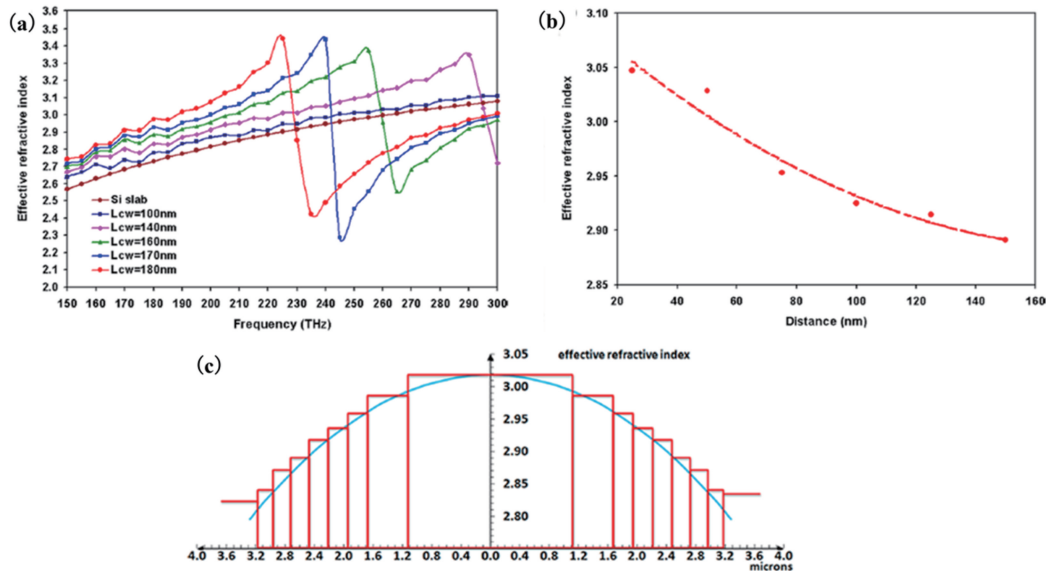


图 3 利用有效折射率设计片上超表面透镜^[46]。(a)不同长度金块对应有效折射率随波长的变化;(b)选定波长下有效折射率随金块长度的变化;(c)各处的有效折射率取值曲线

Fig. 3 Design of on-chip super surface lens using effective refractive index^[46]. (a) Effective refractive indexes of gold blocks with different lengths varying with wavelength; (b) change of effective refractive index with the length of gold block at selected wavelength; (c) curve of effective refractive index at each point

等效折射率随金属条长度的关系,如图 3(b)所示。由几何光学可知,在傍轴近似下,当折射率分布满足

$$n^2(x) = n_0^2 [1 - (gx)^2] \quad (3)$$

时可以将光有效会聚,达到透镜效果,其中 g 为光栅常数, x 为所考察点到光栅中心的距离, n_0 为光栅中心的有效折射率, $n(x)$ 为考察处的有效折射率。在选定光栅中心的有效折射率 n_0 后,即可确定各处有效折射率,如图 3(c)所示。利用有效折射率与金块长度的关系,可以确定各处的金块长度,即确定超表面的所有几何参数。

3.2 传输矩阵模型

在波导传输结构中^[52,54-55],每个传输单元对不同波导模式的透射率可以用传输矩阵来描述,通过改变每个传输单元的几何构型,可以有效调控传输矩阵矩阵元的值,整个结构对不同波导的透射率即为所有单元矩阵元的乘积。由于每个单元的传输矩阵都可独立调节,结构整体调节的自由度较高,故可以实现较为复杂的功能。

以波导模式转换器为例^[52],如图 4(a)所示,超表面结构为在波导传输方向上的一系列刻槽及前后的模式激发与选择单元,可以将其转换部分分为三个部分:模式激发部分、相移部分与模式选择部

分。依次写出每个部分的传输矩阵分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{\text{MES}} &= \begin{pmatrix} \kappa_{11} & \kappa_{12} \\ \kappa_{21} & \kappa_{22} \end{pmatrix}, \\ \mathbf{M}_{\text{PSS}} &= \begin{pmatrix} \exp[-j(\beta_2 - \beta_1)l] & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \\ \mathbf{M}_{\text{MSS}} &= \mathbf{M}_{\text{MES}}^T, \end{aligned} \quad (4)$$

式中: \mathbf{M}_{MES} , \mathbf{M}_{PSS} , \mathbf{M}_{MSS} 分别为模式激发部分、相移部分与模式选择部分的传输矩阵; κ_{ij} ($i, j = 1, 2$) 为各模式的耦合效率; β_1, β_2 为各模式的传播常数; l 为相移部分的长度。

输出各模式振幅与输入模式振幅的关系为

$$\begin{pmatrix} A_{\text{out1}} \\ A_{\text{out2}} \end{pmatrix} = \mathbf{M}_{\text{MSS}} \cdot \mathbf{M}_{\text{PSS}} \cdot \mathbf{M}_{\text{MES}} \begin{pmatrix} A_{\text{in1}} \\ A_{\text{in2}} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式中: $A_{\text{in}}, A_{\text{out}}$ 代表输入输出模式的振幅大小。其中 $\mathbf{M}_{\text{MES}}, \mathbf{M}_{\text{MSS}}$ 已经固定,而 \mathbf{M}_{PSS} 可以通过改变刻槽宽度与相移部分的长度来精确调节,如图 4(b)所示。当给定输入输出模式,即给定 κ_{ij} ($i, j = 1, 2$) 后,可以通过粒子群优化算法搜索得到合适的刻槽宽度与长度,使得给定输入波导模式的情况下,输出模式的目标模式振幅达到最大,而其他模式的振幅尽量小,即实现了不同波导模式的转换。

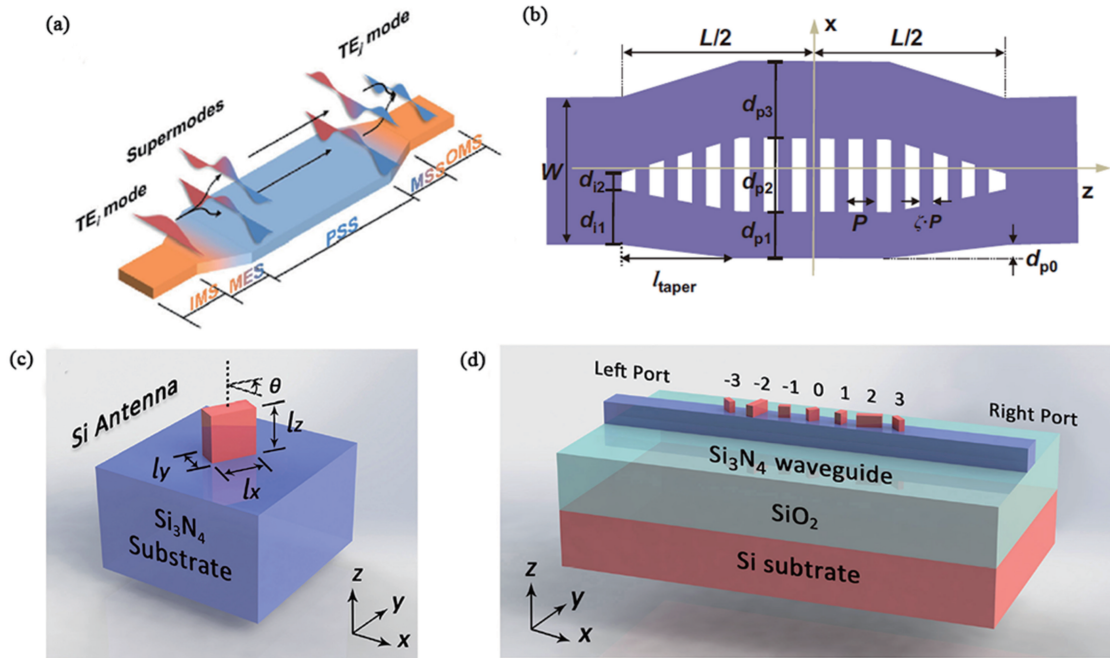


图 4 使用传输矩阵设计的超表面结构示意图。(a)(b)波导模式转换器结构示意图^[52];

(c)(d)任意偏振天线耦合器结构示意图^[39]

Fig. 4 Structure schematic of metasurface design using transfer matrix. (a)(b) Schematic diagram of waveguide mode converter^[52]; (c)(d) schematic diagram of antenna coupler for arbitrary polarization^[39]

在波导上放置天线的耦合器结构中^[39-40],也可使用传输矩阵描述单个天线的传输特性。首先利用模式匹配公式计算目标传输模式对应的每个天线的额外相位延迟,之后通过对比每个天线处的目标相位与入射光相位,即可得到单个天线处的传输矩阵。通过调控天线的形状与位型,可以构造出相应的传输矩阵,实现高效率的耦合。

以文献[40]中天线的耦合器为例,每个天线带来的额外相移可表示为

$$(n_t \sin \theta_t - n_i \sin \theta_i) k_0 = \frac{\Delta \varphi}{d} \text{sign} \left(\frac{\Delta \varphi}{d} \right), \quad (6)$$

式中: n_t 和 n_i 为波导折射率与入射介质折射率; θ_t 和 θ_i 分别为折射角与入射角; k_0 为入射光波数; d 为天线周期; $\Delta \varphi$ 为额外相移。将额外相移与入射光的相位差对比,可以得到每个天线对应的传输矩阵 \mathbf{M} , 其用对角部分与旋转部分来表示,则有

$$\mathbf{M} = \mathbf{R}(-\theta) \begin{bmatrix} \exp(i\varphi_x) & 0 \\ 0 & \exp(i\varphi_y) \end{bmatrix} \mathbf{R}(\theta), \quad (7)$$

式中: $\mathbf{R}(\theta)$ 表征旋转部分,旋转部分 $\mathbf{R}(\theta)$ 可以通过将天线旋转 θ 实现,如图 4(c) 所示;中间矩阵表征对角部分,对角部分相移量可以通过改变天线的长宽(φ_x, φ_y)来准确调控。由于对角部分和旋转角 θ 可以任意选择,因此天线结构可以实现任意的传输矩阵。如图 4(d) 所示,将多个天线组合起来,可独立实现两个偏振方向上任意的额外相移分布,即实现任意偏振光向目标波导模式的高效耦合,并且可以将入射的左右旋光分束。

3.3 反向设计

除了以上通过直接计算所需超表面结构的方法之外,还可通过反向设计确定超表面结构参数^[56-58]。一般流程为:1)根据优化目标预设超表面的结构形状,确定需要优化的参数及参数的取值范围;2)选择合适的优化方法,常用的优化算法有遗传算法、梯度下降算法、水平集算法与密度惩罚算法等。根据优化目标,写出目标函数,并对参数进行优化,最后对优化结果进行测试,评估优化效果。

以超表面无色散透镜与卷积器为例^[56]。如图 5 所示,首先确定超表面结构为双层周期性刻槽结构,且刻槽周期不同,将刻槽预先取为关于中心对称的结构,之后确定优化参数为各刻槽的长度,优化算法使用遗传算法,优化的目标函数为在双波长入射情况下指定平面处能流积分最大化。优化得到最优解之后可通过模拟计算验证优化结果,计算最优解情况下无色散透镜的聚焦效率与透射率,从优化结果

可以看出确实实现了无色散透镜,并可用于片上卷积器的搭建。

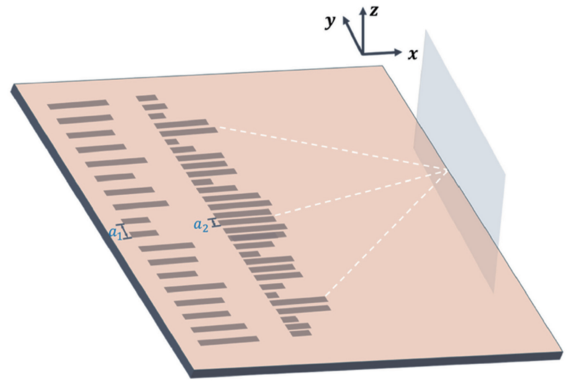


图 5 超表面无色散透镜结构示意图^[56]

Fig. 5 Structural diagram of metasurface dispersionless lens^[56]

4 片上超表面在集成纳米光子器件中的应用

利用上述设计方法,可设计出各种片上超表面结构,这些结构可以实现模式分离、光场耦合、模式转换、波前调控等多种功能。相比于传统的光学器件,其具有体积小、便于集成、耦合或转换效率高、调控精确、实际测试方便等诸多优势,这为下一代片上集成光子器件提供了新的构建途径。

4.1 模式/波长分束器

利用介质超表面结构,可以对不同波导模式^[48,59-60]或不同波长^[57-58]的光实现分束。相比于传统光栅等分束装置,介质超表面结构分束器具有体积小、损耗低、分束效率高、不改变光线传输方向、便于片上集成等优势^[61]。

2019 年, Xu 等^[48]利用超表面结构实现了硅波导中 TM 模与 TE 模的高效率分束。如图 6(a) 所示,分束结构主体使用 SU8 聚合物填充刻蚀后的硅波导,形成周期性亚波长结构。由有效折射率理论可知,此结构对不同偏振方向的传输电场的有效折射率不同,且满足

$$n_o^2 = f \cdot n_{\text{Si}}^2 + (1 - f) \cdot n_{\text{SU8}}^2, \quad (8)$$

式中: n_o 为电场偏振方向垂直于周期方向的有效折射率; n_{Si} 和 n_{SU8} 分别为硅和 SU8 聚合物的有效折射率; f 为硅的占空比。对于 TE 模和 TM 模,其电场偏振方向不同,因此分束结构中不同部分对应的有效折射率也不同。如图 6(b) 所示,对于 TM 模,分束器所有结构对应的有效折射率均为 n_o ,而对于 TE 模,分束器上下部分的有效折射率为 n_o ,而中间部分的有效折射率为 n_e , n_e 为电场偏振方向平行于

周期方向的有效折射率。由此可以看出,如果设计合适的转换器长度,可以使 TM 模通过耦合部分进入下方波导传输,而对于 TE 模,相当于被 n_e 分离的两根独立波导,因耦合很弱,仍在上方波导传输,最终实现了 TE 模与 TM 模的分离。模拟计算与实际实验表明,对于分离后的单个模式,其分离损耗小于 1 dB,而对于不希望该模式出现的波导,其损耗大于 20 dB。该结果证明超表面结构实现了低损耗且高模式分离效率。同年,Xu 等^[60]采用相似的周期性结构,利用 TE 模与 TM 模有效折射率的不同,使 TE 模为传输模式, TM 模为泄露模式,利用传输损耗的不同实现了对混合模式中 TM 偏振的过滤,基于实际器件的 TE 模式传输损耗小于 1 dB 而 TM 模式传输损耗大于 20 dB,成功搭建了片上的全硅起偏器。

Su 等^[57]在 2017 年利用超表面对三个波长光

实现了高透射率分束。如图 6(c)所示,分束结构为一个由密度惩罚算法优化的超表面,通过设置合适的偏置因子,将目标函数设置为三根出射波导中目标波导相对于其他两根波导的相对光强,最终优化得到对 1500 nm,1540 nm 与 1580 nm 三波长分束的分束器。其模拟与实验结果表明,分束后对应目标波导的损耗约为 1 dB~2 dB,而非目标波导损耗均在 10 dB 以上,达到较好的分束效果,且分束后透射率较高,如图 6(d)所示,实现了高效片上波长分束器。Fan 等^[59]在 2019 年利用一维光子晶体结构,构造出两个不同周期的光子晶体结构,使得目标波导的光波长分别落在两个光子晶体的禁带之中,因此每种波长的光只能通过一个光子晶体结构,进而实现对两种不同波长的光的分离。实际结构对 1.3 μm 与 1.6 μm 的光进行分束,两个出射端口的光强比超过 20 dB,故可认为实现了有效分束。

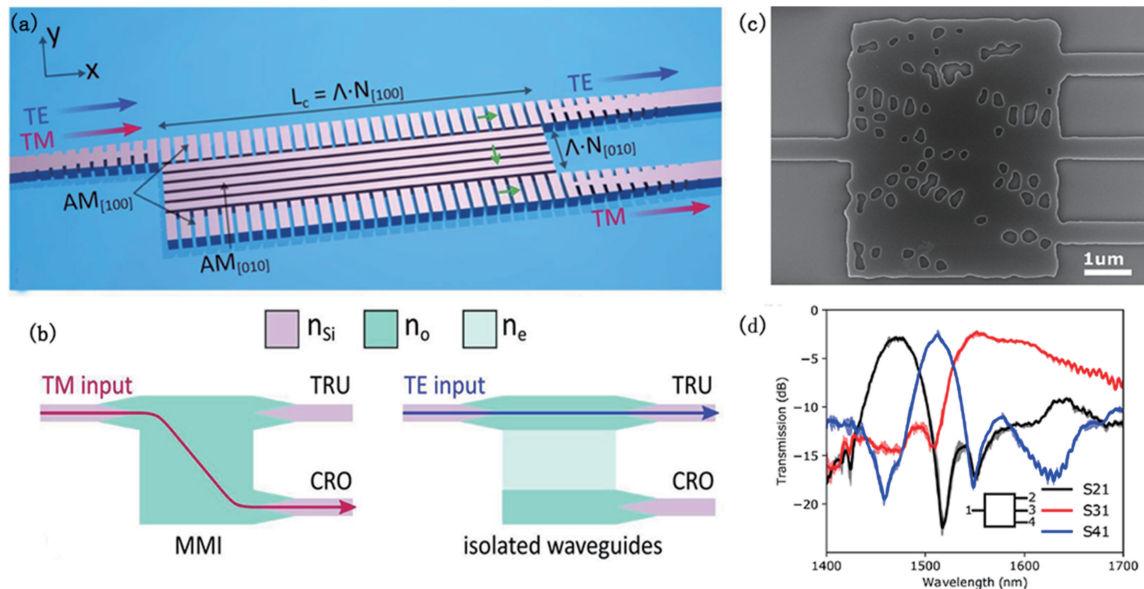


图 6 超表面分束器示意图。(a)超表面模式分束器示意图^[48]; (b)对 TE 与 TM 模,超表面的有效折射率示意图^[48]; (c)超表面波长分束器电镜照片^[57]; (d)不同通道透射率随波长变化测量图^[57]

Fig. 6 Schematic diagrams of metasurface beam splitter. (a) Schematic diagram of metasurface mode beam splitter^[48]; (b) for TE and TM modes, schematic diagrams of the effective refractive index of the metasurface^[48]; (c) electron micrograph of metasurface wavelength beam splitter^[57]; (d) transmission change of different channels with different wavelengths^[57]

4.2 片上耦合器

利用片上超表面结构,还可以实现从自由光场到波导传输模式的片上耦合器^[39-41]。相比于传统的光栅耦合或者棱镜耦合,其具有体积小、耦合效率高、能耦合任意波前的自由光场等优势。并且利用相反的物理过程,也可通过波导模式产生任意波前的辐射场,构造出所需的自由光场^[47]。

2015 年, Cheben 等^[41]实现了任意偏振态光的

波导耦合器,该耦合器的带宽大于 100 nm,尺寸较短。如图 7(a)所示,耦合器结构为一维类光子晶体结构,通过逐渐改变单元的宽度,实现了渐变的有效折射率。并且通过选择结构的周期,避开类光子晶体的布拉格反射区,使得耦合结构有较高的效率。渐变的有效折射率可以使光低损耗地从波导模转化为周期布洛赫模,实现从硅波导到光子晶体波导模式的转换。同时在硅波导端利用硅填充单元间隙,

提供了相位补偿,降低了短结构带来的相位损失。对于任意偏振态入射光,均可通过渐变有效折射率实现高效耦合,耦合损耗约为 0.3 dB,远低于同类耦合器。

Meng 等^[39]在 2019 年实现了任意偏振自由光场耦合器。如图 7(b)所示,耦合器结构为波导上放置周期性天线结构。每个天线为长方体结构,且长宽与长方体转角均可自由调节。由传输矩阵模型可知,利用此结构可实现任意传输矩阵,即可以任意调

节两个偏振方向上的相位延迟且两个方向上的相位延迟均可以独立调节。计算出各天线处自由光场波前与目标波导模式的相位差,即可确定传输矩阵,进而确定各天线的几何参数,实现任意偏振自由光场向波导模的耦合,并且可以通过出射方向的不同,分离入射的左旋与右旋偏振光。在 2012 年,Arango 等^[47]利用相反的物理过程,利用天线结构调控传输模式的相位延迟,反向实现了从波导模式到任意自由光场模式的转换。

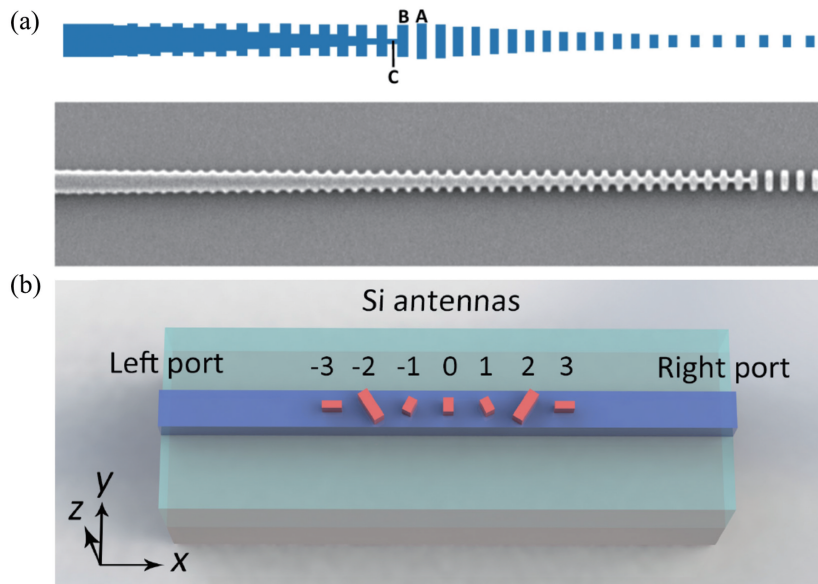


图 7 超表面片上耦合器结构图。(a)光子晶体结构耦合器结构示意图及电镜照片^[41]; (b)天线结构耦合器示意图^[39]

Fig. 7 Structure diagrams of metasurface on-chip coupler. (a) Structure diagram and electron microscope photo of photonic crystal structure coupler^[41]; (b) schematic diagram of antenna structure coupler^[39]

4.3 模式转换器

超表面结构还可以实现片上模式转换器^[39,48,51,54-55]。相比于传统转换器,利用超表面结构参数可以精确调节转换器各部分的传输矩阵,进而获得高效低损耗的波导模式转换,且可选择的目标波导模式较多,同时具有器件尺寸小的优点。

2016 年,Ohana 等^[51]通过在波导内添加刻槽结构引入额外相位,补偿不同模式间的传输相位差,将入射的 TE_0 模式转换为 TE_1 模式,转换后的 TE_1 模式占出射模式的 90% 以上,可认为实现了 TE_0 到 TE_1 的模式转换器。2020 年,Yao 等^[55]利用超表面实现了宽带高效硅波导模式转换器。如图 8(a)所示,转换器使用刻槽结构,通过优化刻槽几何尺寸,调节刻槽部分的传输矩阵,使散射产生的各模式获得不同的传输因子,最终达到其他模式衰减、只保留目标模式的目的。对于从 TE_0 模向 TE_1 模的转换,模拟计算的转换效率超过 90%,而实际实验得到的

转换效率约为 83%,转换效率高于传统转换器。如图 8(b)所示,在工作波段约 230 nm 的带宽内,转换后所有模式中, TE_1 模的占比高于 90%,可认为实现了宽带高效硅波导模式转换器。通过改变刻槽结构,还可实现 TE 基模向其他高阶 TE 模的转换,或者是 TM 模间的转换,超表面模式转换器可实现多种模式转换。

同年,Guo 等^[52]利用超表面实现了任意 TE 模式间模式转换器。如图 8(c)所示,转换器分为模式激发部分、相移部分与选择部分。激发部分产生各种 TE 模,相移部分中通过调整周期性刻槽长度使不同模式获得不同相移,之后利用选择部分选取所需的波导模式,实现模式的转化。如图 8(d)所示,对于目标模式,转换器传输效率约为 95%,而对于其他模式,转换器损耗高于 10 dB,可认为输出即为较单纯的目标模式,且目标模式损耗较低。同时,此模式转换器的尺寸较小,便于与其他元件进行片上集成。

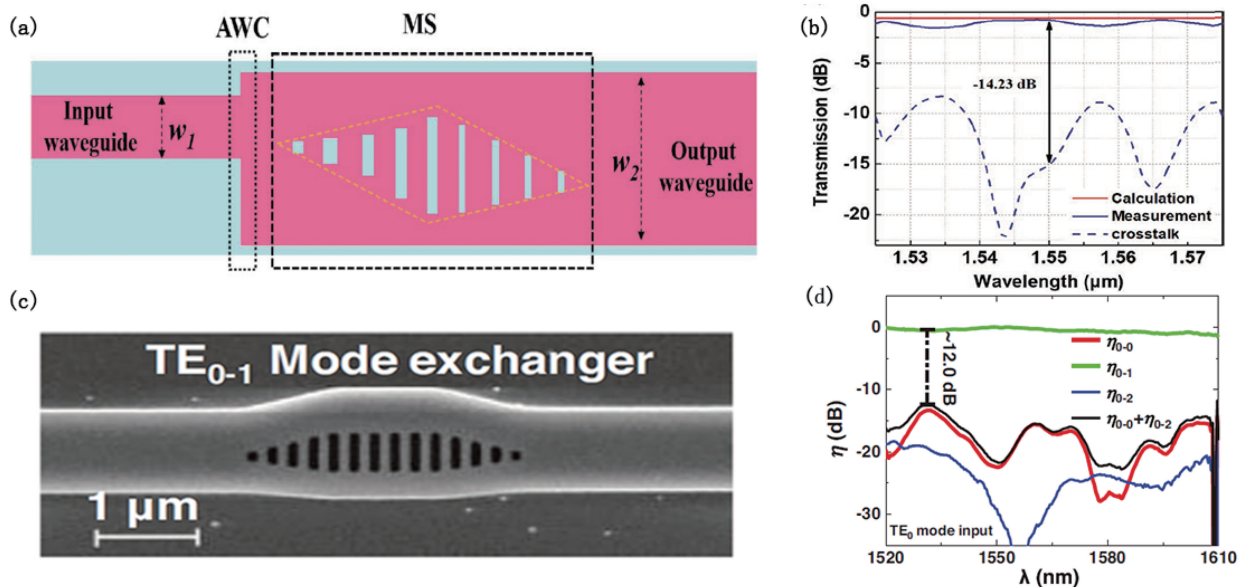


图 8 超表面模式转换器。(a)超表面模式转换器示意图^[55];(b)各种波导模式透射率曲线^[55];
(c)超表面模式转换器电镜照片^[52];(d)各种波导模式转换效率曲线^[52]

Fig. 8 Metasurface mode converter. (a) Schematic diagram of metasurface mode converter^[55]; (b) transmission curves of various waveguide modes^[55]; (c) electron micrograph of metasurface mode converter^[52]; (d) mode conversion efficiency curves of various waveguide modes^[52]

4.4 波前调制器

利用超表面结构可以实现传统结构无法实现的精确波前调控^[45,46,53,56]。由于超表面结构大多为亚波长尺寸,其可以精确改变每点处的光强与相位,进而可以精确调控传输光波前每点处的光强,构造所需的波前。利用得到的波前,还可实现片上卷积器^[56]、差分器^[53]等逻辑运算器件。

2019年Wang等^[53]实现了片上单波长透镜,透镜的聚焦效率超过79%,并且设计了差分器,该差分器可对任意入射光波前实现差分运算。2020年,Liao等^[56]实现了片上无色散透镜,并利用无色散透镜搭建了片上卷积器。如图9(a)所示,无色散透镜结构为双层周期性刻槽,两层结构周期分别为500 nm与300 nm。利用遗传算法优化刻槽长度,使1550 nm与1000 nm的光均能在目标焦点处会聚,最终得到透镜焦距约为8 μm,而双波长焦点位置差距小于100 nm的无色散透镜,光强分布如图9(b)和图9(c)所示,透镜对双波长的聚焦效率为79%与85%,损耗约为2 dB。之后利用无色散透镜,构造4f系统,搭建了双波长卷积器,可实现输入光与共焦面上透射率函数的卷积操作,如图9(d)和图9(e)所示。这为后续搭建更复杂的光信息处理系统奠定了基础。

4.5 非对称传播波导

通过相位梯度调控,可以使传输模式引入附加相位,当入射波导模式沿散射结构附带相位梯度方向反向传播时,二者相位梯度相减,实际的传播相位梯度减小,对应的模式将转化为高阶模式;反之,当入射波导模式沿附带相位梯度方向同向传播时,实际的传播相位梯度增大,对应的高阶波导模式转换为低阶模式。如果传播模式为基模,则传播模式变为衰减模式,不能在波导中传播,由此实现了非对称波导。

Li等^[36]在2017年利用梯度调控实现了氮化硅波导的非对称传播。如图10(a)所示,相位梯度调控结构为硅波导上周期性排列的长方形金块,利用金块的表面等离子体共振提供了额外相位。改变金块的宽度可以实现准确的梯度调控,为每个周期提供5.7°的额外相位。如图10(b)所示,TE基模在从左向右传播过程中通过与表面等离激元模式耦合转化为一阶模及二阶模。如图10(c)所示,光从右向左传播时,TE基模不再被支持,逐渐通过等离激元模式衰减,最终实现了波导模式的单向传播。数值模拟与实际实验表明,对于从左向右传播的TE基模,能流透射率超过90%,而从右向左传播的TE基模,能流透射率在选定波段低于1%,可认为实现了非对称传播。

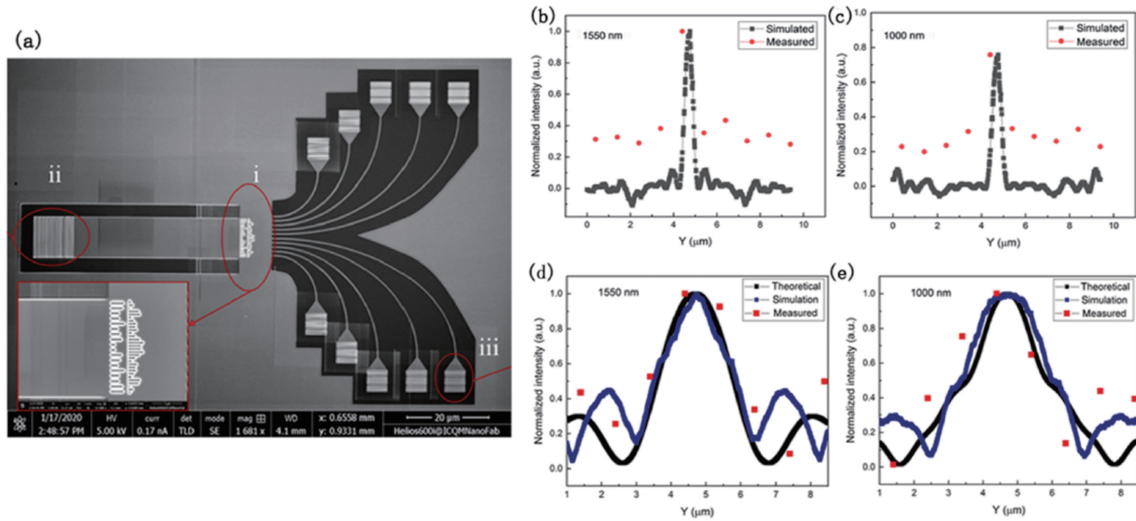


图 9 超表面无色散透镜与卷积器^[56]。(a)超表面无色散透镜电镜照片;(b)(c)入射光波长为 1000 nm 与 1550 nm 时,超表面透镜焦面处光强分布;(d)(e)入射光波长为 1000 nm 与 1550 nm 时,超表面卷积器理论计算、数值模拟与实验结果
Fig. 9 Metasurface dispersionless lens and convolver^[56]. (a) Electron micrograph of metasurface dispersionless lens; (b)(c) intensity distribution at focal plane of metasurface lens for 1000 nm and 1550 nm; (d)(e) theoretical calculation, numerical simulation and experimental results of metasurface convolver for 1000 nm and 1550 nm

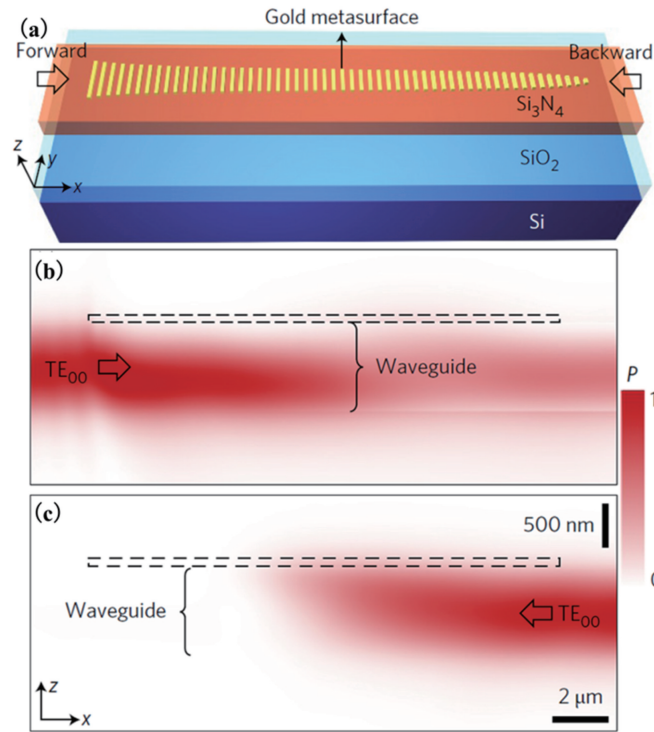


图 10 非对称传播波导^[36]。(a)非对称传播波导结构示意图;(b) TE 基模从左端入射后透射率分布;
(c) TE 基模从右端入射后透射率分布

Fig. 10 Asymmetric propagation waveguide^[36]. (a) Structure diagram of asymmetric propagation waveguide; (b) transmission distribution of incident TE fundamental mode from the left; (c) transmission distribution of incident TE fundamental mode from the right

5 结 论

片上超表面为片上光信号的传输提供了多个自由度,可以实现对振幅、相位和偏振等特性的调控,有望成为实现小尺寸、宽带以及低损耗的片上集成光子计算芯片的途径之一。本文对基于介质超表面的片上集成纳米光子器件进行了综述,从片上超表面的物理机制出发,讨论了包括相位梯度调控、相位匹配、表面等离激元与波导模式耦合以及模式转换等基本机制,为器件结构设计和功能的实现提供了有力的理论基础。此外,回顾了基于片上超表面的各种实现方法,包括有效介质理论、传输矩阵模型以及反向设计等设计方案。作为一个有潜力的、快速发展的研究领域,引起了越来越多研究者的兴趣。在过去的几年里,研究者们提出了许多片上超表面在集成纳米光子器件中的新应用,总结了包括模式/波长分束器、片上耦合器、模式转换器、波前调制器以及片上非对称传播等功能性器件。这些应用在一定程度上拓宽了超表面的应用范围,为下一代片上集成光子器件的构建提供了重要参考。

鉴于片上介质超表面可以用于调控片上光场,且与片上 CMOS 的制备工艺兼容,它对未来现代光子技术领域的推动具有至关重要的意义。下一步其在集成纳米光子器件中的应用研究将从朝向以下几个方面发展。1)时变超表面:随着超快、高非线性材料的出现,可以通过按序切换单个结构的光学特性来增加时间相位梯度。时变梯度将向入射光传递额外的能量,从而在频率上提供类似多普勒的偏移,实现一些相关的应用,例如非互易反射镜、无磁隔离器和超快光束控制。2)动态可重构超表面:结合新型光学非线性材料或相变材料可动态地实现可重构超表面,大大提高对光场的控制能力,从而实现器件功能的可重构性。3)量子超表面:将超表面平台与量子网络系统相结合,超表面的极化和相位调制能力为片上量子系统提供了一个有潜力的方向。

参 考 文 献

- [1] Chen H T, Taylor A J, Yu N. A review of metasurfaces: physics and applications[J]. Reports on Progress in Physics, 2016, 79(7): 076401.
- [2] Holloway C L, Kuester E F, Gordon J A, et al. An overview of the theory and applications of metasurfaces: the two-dimensional equivalents of metamaterials[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2012, 54(2): 10-35.
- [3] Lin D M, Fan P Y, Hasman E, et al. Dielectric gradient metasurface optical elements[J]. Science, 2014, 345(6194): 298-302.
- [4] Liu L X, Zhang X Q, Kenney M, et al. Broadband metasurfaces with simultaneous control of phase and amplitude[J]. Advanced Materials, 2014, 26(29): 5031-5036.
- [5] Arbabi A, Horie Y, Bagheri M, et al. Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission[J]. Nature Nanotechnology, 2015, 10(11): 937-943.
- [6] Shitrit N, Yulevich I, Maguid E, et al. Spin-optical metamaterial route to spin-controlled photonics[J]. Science, 2013, 340(6133): 724-726.
- [7] Balthasar Mueller J P, Rubin N A, Devlin R C, et al. Metasurface polarization optics: independent phase control of arbitrary orthogonal states of polarization[J]. Physical Review Letters, 2017, 118(11): 113901.
- [8] Chong S, Hui L, Shining Z. Transformation optics based on metasurfaces[J]. Science Bulletin, 2019, 64(12): 793-796.
- [9] Yin X, Ye Z, Rho J, et al. Photonic spin Hall effect at metasurfaces[J]. Science, 2013, 339(6126): 1405-1407.
- [10] Ma G C, Yang M, Xiao S W, et al. Acoustic metasurface with hybrid resonances[J]. Nature Materials, 2014, 13(9): 873-878.
- [11] High A A, Devlin R C, Dibos A, et al. Visible-frequency hyperbolic metasurface[J]. Nature, 2015, 522(7555): 192-196.
- [12] Bliokh K Y, Rodríguez-Fortuño F J, Nori F, et al. Spin-orbit interactions of light[J]. Nature Photonics, 2015, 9(12): 796-808.
- [13] Zheng G, Mühlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency[J]. Nature Nanotechnology, 2015, 10(4): 308-312.
- [14] Salem R, Foster M A, Gaeta A L. Application of space-time duality to ultrahigh-speed optical signal processing[J]. Advances in Optics and Photonics, 2013, 5(3): 274-317.
- [15] Marpaung D, Roeloffzen C, Heideman R, et al. Integrated microwave photonics[J]. Laser & Photonics Reviews, 2013, 7(4): 506-538.
- [16] Koos C, Vorreau P, Vallaitis T, et al. All-optical high-speed signal processing with silicon-organic hybrid slot waveguides[J]. Nature Photonics, 2009, 3(4): 216-219.
- [17] Willner A E, Khaleghi S, Chitgarha M R, et al. All-optical signal processing[J]. Journal of Lightwave

- Technology, 2014, 32(4): 660-680.
- [18] Li M, Pernice W H P, Xiong C, et al. Harnessing optical forces in integrated photonic circuits [J]. Nature, 2008, 456(7221): 480-484.
- [19] Nagarajan R, Joyner C H, Schneider R P, et al. Large-scale photonic integrated circuits [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(1): 50-65.
- [20] Su Y K, Zhang Y, Qiu C Y, et al. Silicon photonic platform for passive waveguide devices: materials, fabrication, and applications [J]. Advanced Materials Technologies, 2020, 5(8): 1901153.
- [21] Dai D X, Bauters J, Bowers J E. Passive technologies for future large-scale photonic integrated circuits on silicon: polarization handling, light non-reciprocity and loss reduction [J]. Light: Science & Applications, 2012, 1(3): e1.
- [22] Foster M A, Turner A C, Sharping J E, et al. Broad-band optical parametric gain on a silicon photonic chip [J]. Nature, 2006, 441(7096): 960-963.
- [23] Chen S, Liu W, Li Z, et al. Metasurface-empowered optical multiplexing and multifunction [J]. Advanced Materials, 2020, 32(3): e1805912.
- [24] Chen S Q, Li Z, Zhang Y B, et al. Phase manipulation of electromagnetic waves with metasurfaces and its applications in nanophotonics [J]. Advanced Optical Materials, 2018, 6(13): 1800104.
- [25] Cheben P, Halir R, Schmid J H, et al. Subwavelength integrated photonics [J]. Nature, 2018, 560(7720): 565-572.
- [26] Sun L, Zhang Y, He Y, et al. Subwavelength structured silicon waveguides and photonic devices [J]. Nanophotonics, 2020, 9(6): 1321-1340.
- [27] Zhao C L, Zhang J S. Plasmonic demultiplexer and guiding [J]. ACS Nano, 2010, 4(11): 6433-6438.
- [28] Sun S, He Q, Xiao S, et al. Gradient-index metasurfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves [J]. Nature Materials, 2012, 11(5): 426-431.
- [29] Xie Y B, Wang W Q, Chen H Y, et al. Wavefront modulation and subwavelength diffractive acoustics with an acoustic metasurface [J]. Nature Communications, 2014, 5: 5553.
- [30] Luo X G. Subwavelength optical engineering with metasurface waves [J]. Advanced Optical Materials, 2018, 6(7): 1701201.
- [31] Xu Y D, Fu Y Y, Chen H Y. Planar gradient metamaterials [J]. Nature Reviews Materials, 2016, 1: 16067.
- [32] Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaev V M. Planar photonics with metasurfaces [J]. Science, 2013, 339(6125): 1232009.
- [33] Choudhury S M, Wang D, Chaudhuri K, et al. Material platforms for optical metasurfaces [J]. Nanophotonics, 2018, 7(6): 959-987.
- [34] Guo R, Decker M, Setzpfandt F, et al. High-bit rate ultra-compact light routing with mode-selective on-chip nanoantennas [J]. Science Advances, 2017, 3(7): e1700007.
- [35] Wang C, Li Z, Kim M H, et al. Metasurface-assisted phase-matching-free second harmonic generation in lithium niobate waveguides [J]. Nature Communications, 2017, 8(1): 2098.
- [36] Li Z Y, Kim M H, Wang C, et al. Controlling propagation and coupling of waveguide modes using phase-gradient metasurfaces [J]. Nature Nanotechnology, 2017, 12(7): 675-683.
- [37] Yao C, Singh SC, ElKabbash M, et al. Quasi-rhombus metasurfaces as multimode interference couplers for controlling the propagation of modes in dielectric-loaded waveguides [J]. Optics Letters, 2019, 44(7): 1654-1657.
- [38] Guo X, Ding Y, Chen X, et al. Molding free-space light with guided wave-driven metasurfaces [J]. Science Advances, 2020, 6(29): eabb4142.
- [39] Meng Y, Hu F T, Liu Z T, et al. Chip-integrated metasurface for versatile and multi-wavelength control of light couplings with independent phase and arbitrary polarization [J]. Optics Express, 2019, 27(12): 16425-16439.
- [40] Meng Y, Liu Z T, Xie Z W, et al. Versatile on-chip light coupling and (de) multiplexing from arbitrary polarizations to controlled waveguide modes using an integrated dielectric metasurface [J]. Photonics Research, 2020, 8(4): 564-576.
- [41] Cheben P, Schmid J H, Wang S R, et al. Broadband polarization independent nanophotonic coupler for silicon waveguides with ultra-high efficiency [J]. Optics Express, 2015, 23(17): 22553-22563.
- [42] Schuller J A, Barnard E S, Cai W S, et al. Plasmonics for extreme light concentration and manipulation [J]. Nature Materials, 2010, 9(3): 193-204.
- [43] Ozbay E. Plasmonics: merging photonics and electronics at nanoscale dimensions [J]. Science, 2006, 311(5758): 189-193.
- [44] Gramotnev D K, Bozhevolnyi S I. Plasmonics beyond the diffraction limit [J]. Nature Photonics, 2010, 4(2): 83-91.
- [45] Fan Y L, Cluzel B, Petit M, et al. 2D waveguided

- Bessel beam generated using integrated metasurface-based plasmonic axicon [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(18): 21114-21119.
- [46] Fan Y L, Le Roux X, Korovin A, et al. Integrated 2D-graded index plasmonic lens on a silicon waveguide for operation in the near infrared domain [J]. *ACS Nano*, 2017, 11(5): 4599-4605.
- [47] Arango F B, Kwadrin A, Koenderink A F. Plasmonic antennas hybridized with dielectric waveguides [J]. *ACS Nano*, 2012, 6(11): 10156-10167.
- [48] Xu H N, Dai D X, Shi Y C. Metamaterial polarization beam splitter: ultra-broadband and ultra-compact on-chip silicon polarization beam splitter by using hetero-anisotropic metamaterials [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13(4): 1970021.
- [49] Park J B, Yeo D M, Shin S Y. Variable optical mode generator in a multimode waveguide [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(20): 2084-2086.
- [50] Mohanty A, Zhang M, Dutt A, et al. Quantum interference between transverse spatial waveguide modes [J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 14010.
- [51] Ohana D, Desiatov B, Mazurski N, et al. Dielectric metasurface as a platform for spatial mode conversion in nanoscale waveguides [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(12): 7956-7961.
- [52] Guo J S, Ye C C, Liu C Y, et al. Ultra-compact and ultra-broadband guided-mode exchangers on silicon [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(7): 2000058.
- [53] Wang Z, Li T, Soman A, et al. On-chip wavefront shaping with dielectric metasurface [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 3547.
- [54] Wang H W, Zhang Y, He Y, et al. Compact silicon waveguide mode converter employing dielectric metasurface structure [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018: 1801191.
- [55] Yao C N, Wang Y L, Zhang J H, et al. Dielectric nanoaperture metasurfaces in silicon waveguides for efficient and broadband mode conversion with an ultrasmall footprint [J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(17): 2000529.
- [56] Liao K, Gan T Y, Hu X Y, et al. AI-assisted on-chip nanophotonic convolver based on silicon metasurface [J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(10): 3315-3322.
- [57] Su L, Piggott A Y, Sapra N V, et al. Inverse design and demonstration of a compact on-chip narrowband three-channel wavelength demultiplexer [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(2): 301-305.
- [58] Piggott A Y, Lu J, Lagoudakis K G, et al. Inverse design and demonstration of a compact and broadband on-chip wavelength demultiplexer [J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(6): 374-377.
- [59] Fan Y L, le Roux X, Lupu A, et al. Ultra-compact on-chip metaline-based 1.3/1.6 μm wavelength demultiplexer [J]. *Photonics Research*, 2019, 7(3): 359-362.
- [60] Xu H N, Dai D X, Shi Y C. Anisotropic metamaterial-assisted all-silicon polarizer with 415-nm bandwidth [J]. *Photonics Research*, 2019, 7(12): 1432-1439.
- [61] Halir R, Cheben P, Luque-González J M, et al. Ultra-broadband nanophotonic beamsplitter using an anisotropic sub-wavelength metamaterial [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(6): 1039-1046.