采用介电超表面的紧凑且可扩展的偏振自相干接收器采用介电超表面的紧凑且可扩展的偏振自相干接收器

GO SOMA,[1,4] YOSHIRO NOMOTO,[2] TOSHIMASA UMEZAWA,[3] YUKI YOSHIDA,[3] YOSHIAKI NAKANO,[1] 以及 TAKUO TANEMURA[1,5]

[1]东京大学工学院，日本东京文京区本乡7-3-1[2]滨松光子学株式会社中央研究实验室，日本静冈县滨松市滨北区平口5000[3]日本信息通信研究机构（NICT），日本东京小金井市贯井北町4-2-1[4]soma@hotaka.t.u-tokyo.ac.jp，[5]*tanemura@ee.t.u-tokyo.ac.jp*

摘要：采用基于直接检测的斯托克斯矢量接收机（SVR）的偏振自相干系统，是同时满足短距离光互连成本和容量要求的有前景技术。然而，传统SVR需要大量光学组件才能高速检测偏振态，因此与当前的强度调制直接检测（IMDD）方案相比，其接收器配置要复杂得多。在此，我们演示了一种基于薄介电超表面和光电探测器阵列（PDA）的简单、紧凑型偏振自相干接收器。通过在紧凑的石英上硅芯片上制备单个厚度为1.05-μm的超表面器件，我们实现了所有必要无源器件的功能：一个 1×3 分束器、三个具有不同偏振基的偏振分束器，以及六个聚焦透镜。结合高速PDA，我们演示了20 GBd 16阶正交幅度调制（16QAM）和50 GBd正交相移键控（QPSK）信号经25 km单模光纤的自相干传输。得益于表面法向配置，该接收器能够轻松扩展，以接收来自多芯光纤或光纤束的空分复用信道，从而为未来高度并行化的自相干系统实现紧凑、低成本的接收机模块。

1. 引言

云计算、高清视频流媒体和5G移动服务的快速普及，推动数据中心互连和接入网络中的信息流量持续增长[1]。目前的短距离光链路采用强度调制直接检测（IMDD）格式，例如四电平脉冲幅度调制（PAM4）；然而，由于频谱效率有限，且光纤色散会造成严重的信号失真，要将基于IMDD的收发器扩展至超过Tb/s颇具挑战。另一方面，城域网和长途网络中使用的数字相干系统能够充分利用光的四维信号空间，并通过数字信号处理（DSP）完全补偿线性损伤，从而轻松扩展容量。然而，相干收发器的成本、复杂度和功耗都显著更高，阻碍了其在短距离光互连和接入网络中的部署。

为了解决这些问题，自相干传输方案应运而生，成为一种有望弥合传统强度调制直接检测（IMDD）与相干系统之间差距的方法 [2-7]。在该方案中，连续波（CW）音调与高容量相干信号一同传输，并在基于直接检测的接收机中混合，以恢复信号的复光场。与完整的相干系统不同，该方案无需在接收端使用本地振荡器（LO）激光器，也不必严格要求使用波长调谐窄线宽激光光源，这意味着可以采用成本显著更低的宽

线宽非制冷激光器 [4]。此外，由于激光相位噪声和频率偏移的影响得以减轻，数字信号处理（DSP）的计算成本可以显著降低[7, 8]。因此，自相干系统能够实现低成本、低功耗且高容量的数据传输，满足未来数据中心互连和接入网络的需求。

在自相干系统的多种实现方案中，采用斯托克斯矢量接收机（SVR）的偏振测量方案 [9-11] 具有简洁性方面的优势。在该方案中，相干信号以单一偏振态传输，同时在正交偏振态上发送连续波音调。接收端通过获取斯托克斯参数 $\mathbf{S} = [S_1, S_2, S_3]$ ，在补偿偏振旋转、色散及其他信号失真的影响后，利用数字信号处理对同相正交（IQ）信号进行解调。迄今为止，已有多项高速偏振自相干传输实验见诸报道，其中的SVR采用现成分立元件实现 [3, 10-12]。为推动实际应用，研究人员还在硅 [13, 14] 和磷化铟 [15-18]平台上实现了集成波导式斯托克斯矢量接收机。最近，研究人员还利用纳米光子电路 [19, 20] 和液晶光栅 [21] ，结合外置光电探测器（PD），演示了表面法向斯托克斯矢量接收机。然而，与传统的低成本强度调制直接检测接收机相比，这些器件仍存在较大的光纤到芯片耦合损耗，和/或需要使用外部透镜将光聚焦到光电探测器上。

本文展示了利用紧凑型表面法向SVR进行高速偏振测量自相干信号检测。该SVR由基于超表面的偏振分选器件和高速二维光电探测器阵列（2D-PDA）组成。超表面是一种由亚波长结构构成的二维阵列，可在局部改变入射光的强度、相位和偏振 [22]。与此前用于成像和传感应用的基于超表面的偏振计研究 [23-27], 不同，我们的器件能够高效耦合来自单模光纤（SMF）的自相干光信号，并将其无透镜聚焦至六个高速光电二极管（PD）。具体而言，通过叠加三种超原子阵列，该器件在单个超薄器件内实现了所有必要无源器件的功能，即一个1×3 分束器、三个具有不同偏振基的偏振分束器（PBS）以及六个透镜。将该器件与基于磷化铟/铟镓砷的二维光电探测器阵列芯片结合后，我们展示了偏振测量自相干信号在 25 km单模光纤上的无损耗传输，信号格式包括20 GBd 16阶正交幅度调制（16QAM）和 50 GBd正交相移键控（QPSK）。得益于具备内嵌聚焦功能的表面法向配置，我们实现了与二维光电探测器阵列的高效无透镜耦合。因此，所展示的SVR具有与传统低成本强度调制直接检测接收器相当的复杂度，可集成于紧凑型接收机光学组件（ROSA）中。此外，该器件还可轻松扩展，以接收来自多芯光纤（MCF）或光纤束的空分复用信道，这类信道有望应用于未来 >Tb/s 的高度并行化光互连中 [28-31]。

2. 器件概念

图1(a)展示了所提出的表面法向SVR的示意图。来自单模光纤的光入射到一款薄型基于超表面的偏振分选器件上，该器件旨在实现与插图所示传统偏振计相同的功能。具体而言，它将光分成三路，分别解析出每一路在三种不同偏振基下的正交分量，并将其聚焦到集成在二维光电探测器阵列芯片上的六个光电二极管。与此前展示的基于超表面的偏振计不同 [23-27], ，我们提出的SVR还集成了1×3 分束器和六个超透镜，从而实现从单模光纤到高速二维光电探测器阵列的直接耦合。因此，整个器件可装入紧凑型接收光学组件模块中，其尺寸可与当前的强度调制直接检测接收机相媲美。此外，由于采用表面法向配置，该方案只需将输入单模光纤替换为多芯光纤或光纤束，并使用更大规模的光电探测器阵列[32] ，即可轻松扩展以接收多个空间信道，而无需增加组件数量，如图1(b)所示。

为了利用单个超表面层并行实现三种操作，我们采用空间复用方法 [33，34]；如图1(c)所示，三个独立设计的超原子阵列相互叠加，分别标记为MA1（红色）、MA2（蓝色）和MA3（绿色）。MA1的相位分布$\varphi(x,y)$经过设计，可将光的x偏振分量聚焦到焦平面上的光电二极管$_{x}$，并将y偏振分量聚焦到光电二极管$_{y}$，如插图所示。类似地，MA2和MA3分别作为嵌入超透镜的偏振分束器，用于±45°偏振基（a/b）和右/左旋圆偏振（右旋圆偏振/左旋圆偏振）基（r/l），并将相应分量分别聚焦到光电二极管$_{a,\ b}$和光电二极管$_{r,\ l}$。随后，通过对光电流信号$S_1 = I_x - I_y$、$S_2 = I_a - I_b$和$S_3 = I_r - I_l$取差，可得斯托克斯矢量$\mathbf{S} \equiv (S_1, S_2, S_3)^T$，其中$I_p$表示光电二极管$_p$处的光电流。需要指出的是，这种采用三个无偏振片平衡光电探测器的方案，在各种SVR配置中具有最高的接收灵敏度 [35] ；与采用非最优偏振基的先前方案相比，该方案更具优势[19-21]。

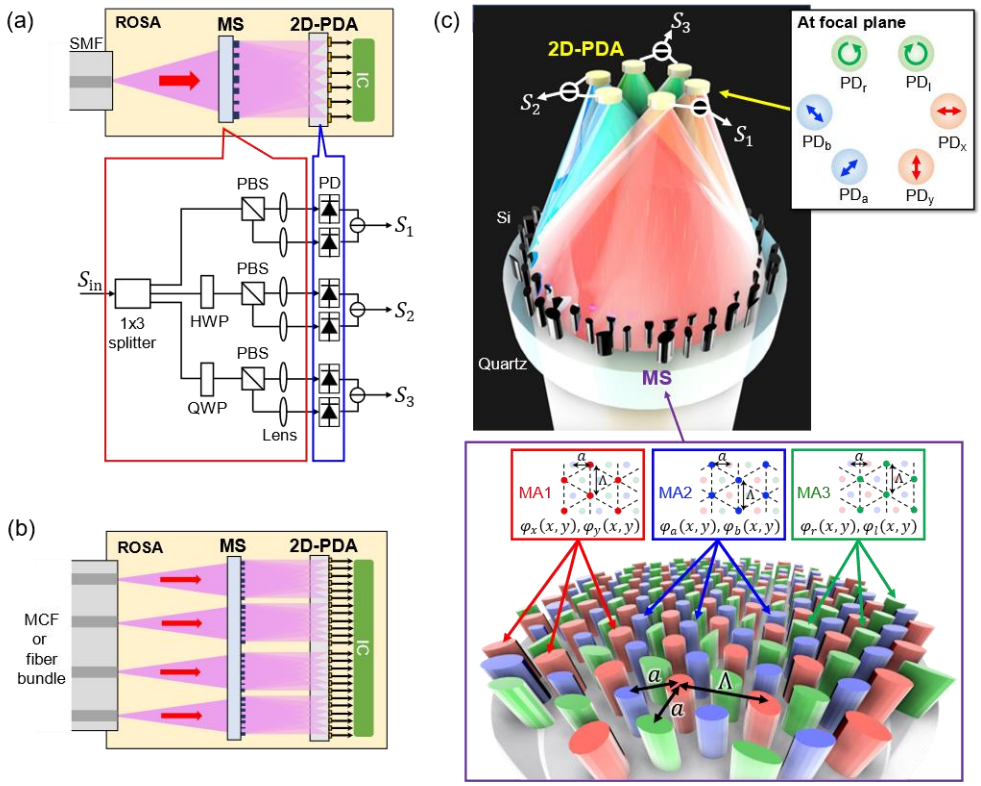


图 1. 基于叠加超原子阵列的表面法向SVR。(a) 接收器模块示意图。单个超表面器件实现了等效电路所需的全部无源光学元件，如插图所示。MS：超表面。PDA：光电探测器阵列。IC：集成电路。HWP：半波片。QWP：四分之一波片。PBS：偏振分束器。(b) 可扩展配置，用于接收来自多芯光纤或光纤束的多个输入通道。(c) 所设计超表面的功能与配置。来自单模光纤的入射光被分为三条路径，并根据输入偏振态聚焦到位于不同位置的六个光电二极管上。叠加的超原子阵列（MA1、2 和 3）分别作为偏振分束器和金属透镜，适用于 x/y 线偏振、±45° 线偏振以及 RHC/LHC 偏振基。

3. 超表面设计与制造

我们采用位于石英层上的椭圆形硅纳米柱作为介电超表面，其高度为1050纳米。通过改变每个纳米柱两条主轴的长度（D_u、 D_v）以及面内旋转角θ，即可控制透射光的相位及其偏振依赖性，如图2(a)所示[22]。在此，每个超原子阵列MA1-3均采用亚波长晶格常数为$\Lambda = 700\sqrt{3}$ 纳米的三角晶格，以抑制非零级衍射。随后，将三个超原子阵列的位置分别平移$a = 700$ 纳米并叠加，形成整体超表面，如图1(c)所示。

首先，将θ设为0，并采用严格耦合波分析（RCWA）方法[36]，模拟波长为1550纳米时均匀纳米柱阵列对x偏振光和y偏振光的透射特性。根据模拟结果，我们首先推导出t_u（D_u、 D_v）和t_v（D_u、 D_v），分别表示x偏振光和y偏振光的复透射率随D_u 和D_v变化的函数。随后，我们推导出所需的（D_u、 D_v），使各偏振分量分别产生（φ_u、 φ_v）的相移。结果绘于图2(b)中（详情见补充材料1的S1节）。图2(c)还展示了各情况下的透射率振幅。我们可以确认，通过适当设定椭圆的尺寸，可在保持高透射率的同时，为x偏振和y偏振分量实现任意相移。

如图 2(a) 所示，将椭圆形纳米柱旋转 θ 后，这种双折射便可应用于取向角为任意角度 [37] 的线偏振基。需要指出的是，相移和透射振幅对 θ [22] 几乎不敏感，因此对于所有 θ，都能得到与图 2(b) 和 2(c) 所示相似的结果。这是因为光被强烈限制在每个硅纳米柱内部，因此相邻超原子之间的光耦合对透射的影响很小。

我们还可以利用超原子的几何相移 [38]，为正交圆偏振态提供任意相移。首先，谨慎选择 D_u 和 D_v，使其满足 $\varphi_u + \pi$ $= \varphi_v$，从而让每个纳米柱充当半波片。在这种情况下，输入的右旋圆偏振态和左旋圆偏振态分别转换为左旋圆偏振态和右旋圆偏振态。此外，它们透射后的相位可写为 $(\varphi_r, \varphi_l) = (\varphi_u + 2\theta, \varphi_u - 2\theta)$（推导过程见补充材料 1 的第 S2 节）。因此，选择每个纳米柱的 D_u 和 D_v，以获得所需的 φ_u （=（$\varphi_r + \varphi_l$）/2），同时满足条件 $\varphi_v = \varphi_u + \pi$。角度 θ 也确定为 $(\varphi_r - \varphi_l)/4$。

为了实现金属透镜的功能，每个超原子阵列都需要施加具有空间依赖性的相位分布，如下所示：[39]

$$\varphi(x, y) = -\frac{2\pi}{\lambda}\left(\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + f^2} - f\right), \quad (1)$$

其中，(x_0, y_0) 是焦点的平面内位置，f 是焦距，λ 是工作波长。在本工作中，我们设定 λ = 1550 nm、f = 10 mm，并将整个超表面区域的直径设为 2 mm，对应的数值孔径 (NA) 为 ~0.10。六个焦点按正六边形排列，间距为 60 μm，与我们自相干实验中使用的高速二维光电探测器阵列的位置相匹配。在这些条件下，MA1、2 和 3 所需的相位分布如图 2(d) 所示。值得注意的是，由于当前光学装置在缩短焦距 f 方面存在限制，本工作采用了尺寸相当大的（2 mm）超表面。在图 1(a) 所示的完全封装模块中，通过缩短 f 并设计每个纳米柱的几何参数，使其满足式 (1) 给出的所需相位分布，我们可以轻松地将整个超表面区域缩小到几十微米。

采用具有1050纳米厚硅层的石英上硅（SOQ）衬底制备所设计的超表面。使用ZEP520A 光刻胶，通过电子束光刻定义纳米柱图案。随后，使用SF_6, C_4F_8, 和O_2通过电感耦合等离子体反应离子刻蚀（ICP-RIE）将图案转移至硅层。图3(a)-(c)展示了所制备

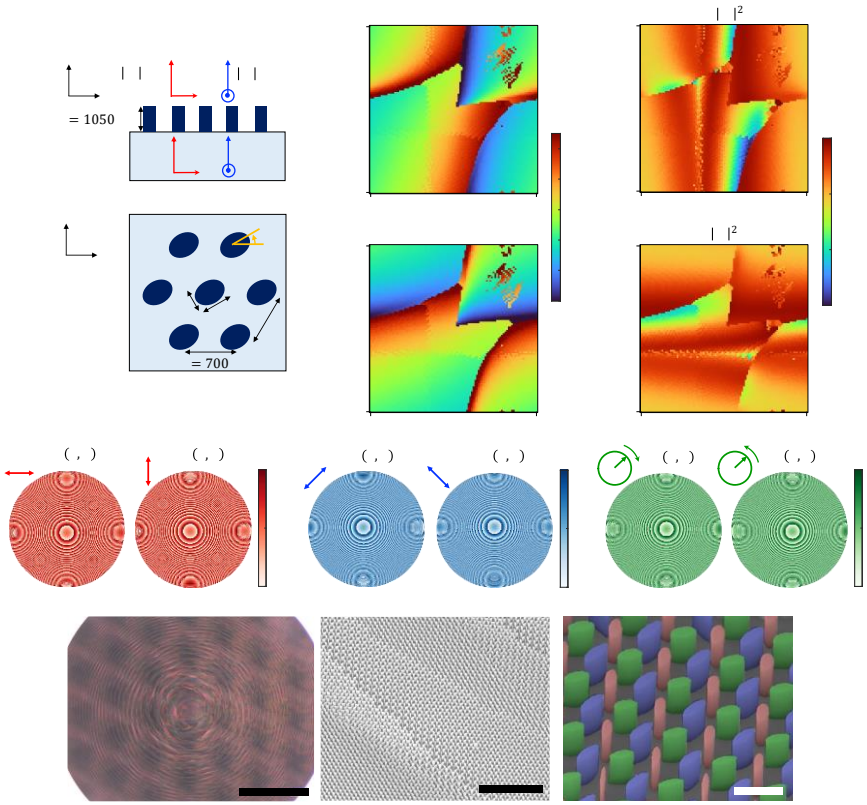


图 2. 超表面设计与制造。(a) 硅纳米柱周期阵列示意图，硅纳米柱位于三角晶格的顶点处，晶格常数为 a 700 nm。针对椭圆柱不同的轴长（D_u、D_v），对 x 偏振光和 y偏振光的透射进行仿真。(b) 为获得 x 偏振光和 y偏振光的相移（φ_u、φ_v），所需的（D_u、D_v）。为便于制造，D_u 和D_v 的范围限制在 100 nm 至 650 nm。(c) (b) 中各情况下的透射率振幅随（ φ_u φ_v 1, , ）的变化。(d) 2, 3 MA 和 的所需相位分布。(e) 制造器件的光学显微镜图像，以及 (f, g) 扫描电子显微镜图像。(g) 中的图像经过伪彩色处理，以区分 MA1、2 和 3。

4. 制备超表面的静态表征

我们首先通过观察不同输入偏振态（SOP）下焦平面处的强度分布，对制备的超表面进行了表征。实验装置如图3(a)所示。波长为1550纳米的连续波光入射至超表面。通过旋转半波片（HWP）和四分之一波片（QWP）来调节偏振态。使用4-f透镜系统将焦平面图像放大50倍，并由铟镓砷相机拍摄。根据六个焦点位置处检测到的强度值，按照第2节所述方法恢复斯托克斯矢量。为实现聚焦功率的定量测量，我们插入翻转镜，并使用光阑对每个目标位置处的聚焦光束进行空间滤波，随后用桶式光电探测器测量总功率。

图 3(b) 显示了输入斯托克斯矢量设为 (±1, 0, 0)、(0, ±1, 0) 和 (0, 0, ±1) 时观测到的强度分布。可以确认，入射光透过超表面后聚焦到六个明确的位置。此外，其强度分布会随偏振态（SOP）而变化；x/y 线偏振、±45° 线偏振以及右旋圆偏振/左旋圆偏振光分量均如预期聚焦到设计位置。图 3(c) 显示了恢复得到的斯托克斯

矢量在庞加莱球上的分布。平均误差〈|**Δ**S|〉仅为 0.028。图 3(d) 显示了测得的光在六个位置的聚焦效率。扣除1×3 分束器[（见图 1(a)）], 导致的 4.8 dB 固有损耗后，额外损耗约为 6.1 dB，而正交光电探测器位置处的串扰则被抑制了 13–20 dB。虽然这一额外损耗已与先前报道的基于波导的斯托克斯矢量接收器的耦合损耗和传播损耗相当[13-18], 但我们预计，通过在二氧化硅表面应用增透膜、改进制造工艺以尽量减少误差，以及采用在超表面设计中考虑相邻超原子间非零相互作用的先进算法，可以进一步提升性能[40, 41]。

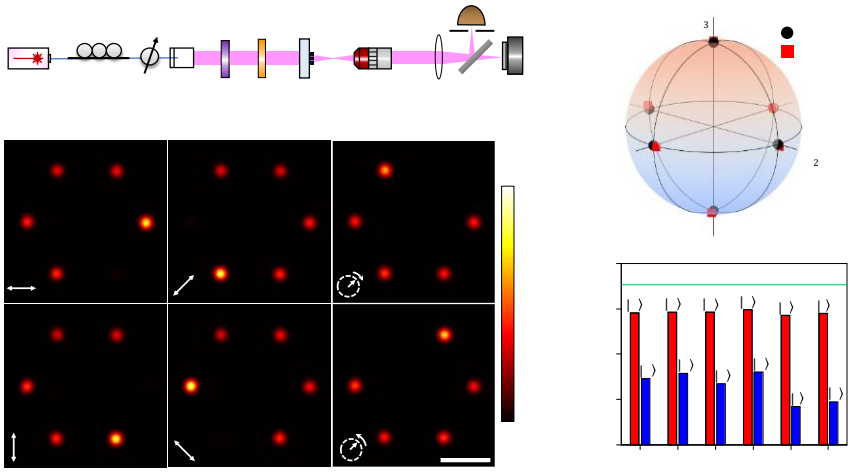


图3. 制成超表面的实验表征。(a) 光学装置示意图。翻转镜用于切换焦平面强度分布的采集与各聚焦光束功率的测量。TLS：可调谐激光源。PC：偏振控制器。VOA：可变光衰减器。FC：光纤准直器。Pol.：偏振片。HWP：半波片。QWP：四分之一波片。MS：超表面。M：翻转镜。PD：光电探测器。(b) 不同输入偏振态下焦平面的实测强度分布。(c) 庞加莱球上的反演斯托克斯矢量和输入斯托克斯矢量。(d) 各光电探测器的实测聚焦效率。绿色线表示分成三条路径所导致的固有损耗。每个柱形上方标出了输入偏振。

5. 自相干信号传输实验

随后，我们使用制成的超表面进行了偏振测量自相干信号传输实验。实验装置如图4所示。我们采用了一个具有基于 InP/InGaAs 的 p-i-n 结构的19像素二维光电探测器阵列[42], , 其中六个光电探测器如图4(b)所示。每个光电探测器的直径为30 μm，实测带宽超过10 GHz，响应度为0.3 A/W。二维光电探测器阵列芯片

每个光电二极管均连接射频（RF）同轴连接器进行封装。如图4(c)所示，二维光电探测器阵列放置在距超表面焦距为 10 mm 的位置。该距离仅受当前实验装置的限制；在实际的完全封装模块中，应缩短至亚毫米量级，这与当前的 IMDD 接收模块相当。

波长为1550纳米的连续波光由可调谐激光源（TLS）产生，并分为两个端口，分别用作信号端口和导频音端口。在信号端口，使用$LiNbO_3$ IQ调制器生成高速相干光信号。任意波形发生器（AWG）输出的驱动电信号经过奈奎斯特滤波器处理。随后，使用偏振合束器（PBC）将调制后的光信号与导频音合束。通过可变光

衰减器（VOA）调节导频音的光功率，使两者的功率近乎平衡。随后，自相干信号经25千米单模光纤传输。在接收端，使用另一个VOA控制光信噪比（OSNR），之后依次经过掺铒光纤放大器（EDFA）和光带通滤波器（OBPF）。光电探测器阵列（PDA）中六个光电探测器的电信号经差分射频放大器放大后，由实时示波器（OSC）采集。波特率超过20 GBd时，由于光电探测器阵列模块内部存在残余偏斜，我们无法使用平衡光电探测器（B-PD）配置。在这些情况下，我们采用四个单端光电探测器（S-PD），并由四通道实时示波器分别采集PD_x、PD_y、PD_a和PD_l的电信号，以便在数字信号处理（DSP）过程中校准偏斜。通过比较两种配置下的结果，验证了使用四个S-PD的可行性（详情见补充材料1的S3节）。为了均衡并重构原始同相正交信号，我们采用离线数字信号处理，分别对三路B-PD和四路S-PD配置使用 2×3 和 2×4 实值多输入多输出（MIMO）均衡器[43, 44] 。

图5(a)–(c)展示了使用三路B-PD配置测得的 15 吉波特 16 阶正交振幅调制信号的误码率曲线和星座图。结果表明，即使经过 25 km 透射，误码率仍远低于硬判决前向纠错（HD-FEC）阈值，且几乎没有惩罚。图5(d)–(f)展示了使用四路S-PD配置测得的 20 吉波特 16 阶正交振幅调制信号和 50 吉波特 QPSK信号的结果。同样，误码率低于 HD-FEC 阈值。最后，图6展示了在 1540 nm 和 1565 nm 波长下测得的 15 吉波特 16 阶正交振幅调制信号的误码率曲线和星座图，证明了所设计超表面的宽带工作能力。虽然本研究中的波特率受二维光电探测器阵列的带宽限制，但采用带宽超过 50 GHz 的高速表面法向光电探测器，有望实现超过 100 GBd 的透射

[45, 46]。

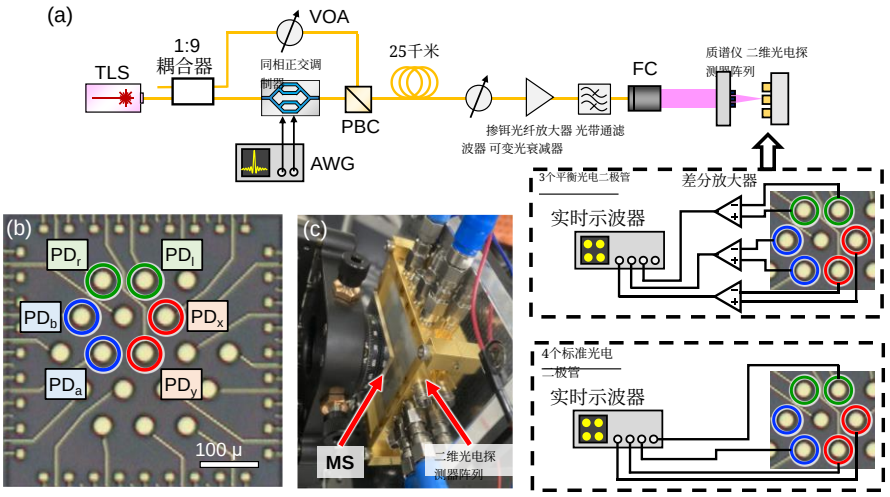


图4. 使用制备的超表面和二维光电探测器阵列进行的自相干传输实验。(a) 实验装置。AWG：任意波形发生器。PBC：偏振合束器。EDFA：掺铒光纤放大器。OBPF：光带通滤波器。Osc：示波器。插图中展示了三路平衡光电二极管和四路单端光电探测器配置。(b) 制备的19像素二维光电探测器阵列的光学显微镜图像。实验中使用了用圆圈标出的六个光电二极管。(c) 接收器照片。

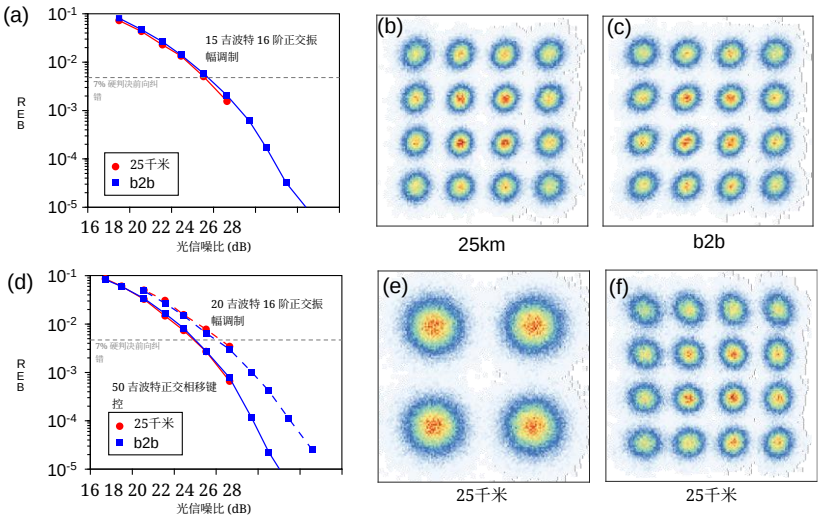


图5. 波长为1550纳米时自相干信号传输的实验结果。(a)–(c) 使用三路B-PD配置测得的15 GBd 16QAM信号在传输前（背靠背，b2b）和经25千米传输后的误码率曲线和星座图。(d)–(f) 使用四路S-PD配置测得的20 GBd 16QAM和50 GBd QPSK信号经25千米传输后的误码率曲线和星座图。

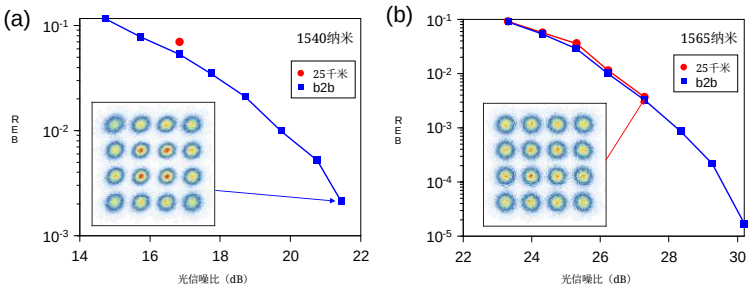


图6. 波长为(a) 1540纳米和(b) 1565纳米时自相干信号传输的实验结果。(a, b) 使用三路B-PD配置测得的15 GBd 16QAM信号在传输前（背靠背，b2b）和经25千米传输后的误码率曲线。插图为恢复出的星座图。

6. 结论

我们提出并演示了一种用于高速偏振自相干系统的表面法向SVR，该方案采用介电超表面和二维光电探测器阵列。我们将三个独立设计、基于硅纳米柱的超原子阵列叠加在单个薄超表面层上，同时实现偏振分选和聚焦功能。利用在SOQ衬底上制备的紧凑型超表面芯片，我们演示了20 吉波特 16 阶正交振幅调制和50 吉波特正交相移键控自相干信号的25公里传输。工作波特率仅受二维光电探测器阵列限制，因此采用带宽更宽的光电探测器阵列有望实现更高容量的传输。得益于独特的表面法向配置及其集成的透镜阵列功能，可以实现尺寸和复杂度与传统强度调制直接检测接收机相当的紧凑型接收器模块。此外，只需更换单模光纤，即可轻松扩展该方案，以接收空分复用信道

至多芯光纤，并采用更大规模的集成式PDA技术[32]。因此，这项工作将为实现面向未来的高性价比接收机铺平道路>Tb/s空分复用光互连。

经费支持。 日本信息通信研究机构（NICT）。

致谢。本研究由日本信息通信研究机构（NICT）委托研究项目03601资助。部分研究成果曾于2022年光纤通信大会（OFC）上报告，编号为M4J.5。部分器件制造工作在东京大学的d.lab洁净室设施中完成，并获得日本文部科学省纳米技术平台的支持。作者还感谢NICT先进ICT器件实验室的所有技术人员对PDA器件制造的支持。G.S.感谢创新学生基金（OASIS）光学与先进激光科学项目以及世界领先创新研究生课程——量子科学与技术奖学金项目（WINGS-QSTEP）的经费支持。

参考文献

1. 思科年度互联网报告（2018-2023），思科白皮书。（2020）。2. W. Shieh 和 H. Ji，“先进的直接检测方案”，载于《光纤通信会议》（OFC）2021年会议论文集，论文编号 Th4D.5。3. D. Che、A. Li、X. Chen、Q. Hu、Y. Wang 和 W. Shieh，“线性复光信道的斯托克斯矢量直接检测”，《光波技术杂志》33，678–684（2015）。4. T. Gui、X. Wang、M. Tang、Y. Yu、Y. Lu 和 L. Li，“面向下一代数据中心互连的零差相干双向传输实时演示”，《光波技术杂志》**39**，1231–1238（2021）。5. T. Gui、H. Du、K. Zheng、J. Cao、S. Yuan、C. Yang、M. Tang 和 L. Li，“面向共封装光输入输出交换机应用，通过1+8 多芯光纤实现实时 6.4 Tbps（8×800 G）SHCD传输”，载于《光纤通信会议》（OFC）2022年会议论文集，论文编号 Th4C.1。6. M. Mazur、A. Lorences-Riesgo、J. Schröder、P. A. Andrekson 和 M. Karlsson，“采用单一共享光导频音实现的高频谱效率 PM-128QAM 光频梳超信道传输”，《光波技术杂志》36，1318–1325（2018）。7. S. Ishimura、Y. Nakano 和 T. Tanemura，“激光相位噪声对采用高阶QAM格式的自相干收发机的影响”，《光波技术杂志》**39**，6150–6158（2021）。8. R. S. Luís、B. J. Puttnam、G. Rademacher、S. Shinada 和 N. Wada，“群速度色散对偏振不敏感自零差检测接收机的影响”，《IEEE 光子学技术快报》**29**，631–634（2017）。9. K. Kikuchi 和 S. Kawakami，“斯托克斯空间中的多电平信号传输及其在大容量光通信中的应用”，《光学快报》22，7374（2014）。10. D. Che、A. Li、X. Chen、Q. Hu、Y. Wang 和 W. Shieh，“短距光通信中的斯托克斯矢量直接检测”，《光学快报》39，3110（2014）。11. T. Hoang、M. Sowailem、Q. Zhuge、M. Osman、A. Samani、C. Paquet、S. Paquet、I. Woods 和 D. Plant，“利用QAM-PAM斯托克斯矢量调制实现高容量长距直接检测传输”，《光波技术杂志》36，460–467（2018）。12. H. Ji、D. Che、C. Sun、J. Fang、G. Milione、R. R. Unnithan 和 W. Shieh，“少模光纤中的高维斯托克斯矢量直接检测”，《光学快报》44，2065（2019）。13. P. Dong、X. Chen、K. Kim、S. Chandrasekhar、Y.-K. Chen 和 J. H. Sinsky，“利用硅光子斯托克斯矢量接收机和I/Q调制器实现128-Gb/s、100-km直接检测传输”，《光学快报》**24**，14208–14214（2016）。14. S. Ishimura、T. Fukui、R. Tanomura、G. Soma、Y. Nakano 和 T. Tanemura，“采用对称硅光子斯托克斯矢量接收机的64-QAM自相干传输”，载于《光纤通信会议》（OFC）2022年会议论文集，论文编号 M4J.6。15. S. Ghosh、T. Tanemura、Y. Kawabata、K. Katoh、K. Kikuchi 和 Y. Nakano，“通过磷化铟上的偏振分析电路解码多电平斯托克斯矢量调制信号”，《光波技术杂志》36，187–194（2018）。16. T. Suganuma、S. Ghosh、M. Kazi、R. Kobayashi、Y. Nakano 和 T. Tanemura，“采用多量子阱光电探测器的单片磷化铟斯托克斯矢量接收机”，《光波技术杂志》36，1268–1274（2018）。17. S. Ghosh、T. Suganuma、S. Ishimura、Y. Nakano 和 T. Tanemura，“通过基于磷化铟的光子集成电路完整恢复多电平斯托克斯矢量信号”，《光学快报》**27**，36449–36458（2019）。18. M. Baier、F. M. Soares、A. Schoenau、Y. D. Gupta、D. Melzer、M. Moehrle 和 M. Schell，“用于400 Gbit/s的全集成斯托克斯矢量接收机”，载于《光纤通信会议》（OFC）2019年会议论文集，论文编号 Tu3E.2。19. T. Lei、C. Zhou、D. Wang、Z. Xie、B. Cai、S. Gao、Y. Xie、L. Du、Z. Li、A. V. Zayats 和 X. Yuan，“基于光子自旋霍尔效应的片上高速相干光信号检测”，《激光与光子学评论》16，2100669（2022）。20. C. Zhou、Y. Xie、J. Ren、Z. Wei、L. Du、Q. Zhang、Z. Xie、B. Liu、T. Lei 和 X. Yuan，“基于逆向设计的片上自旋分离光学偏振计”，《纳米光子学》11，813–819（2022）。21. Y. Xie、T. Lei、D. Wang、J. Ren、Y. Dai、Y. Chen、L. Du、B. Liu、Z. Li 和 X. Yuan，“采用自旋依赖型光栅的高速斯托克斯矢量接收机”，《光子学研究》9，1470–1476（2021）。

22. A. Arbabi、Y. Horie、M. Bagheri 和 A. Faraon，“采用介质超表面实现相位与偏振的完全控制，具有亚波长空间分辨率和高透射率”，《自然·纳米技术》10，937–943（2015）。23. E. Arbabi、S. M. Kamali、A. Arbabi 和 A. Faraon，“利用介质超表面实现全斯托克斯成像偏振测量”，《ACS 光子学》5，3132–3140（2018）。24. J. P. B. Mueller、K. Leosson 和 F. Capasso，“超紧凑超表面在线偏振计”，《光学》3，42–47（2016）。25. A. Pors、M. G. Nielsen 和 S. I. Bozhevolnyi，“用于同时确定斯托克斯参数的等离激元超光栅”，《光学》2，716–723（2015）。26. Z. Yang、Z. Wang、Y. Wang、X. Feng、M. Zhao、Z. Wan、L. Zhu、J. Liu、Y. Huang、J. Xia 和 M. Wegener，“用于偏振测量光束轮廓分析的介质超透镜子阵列广义哈特曼-夏克阵列”，《自然·通讯》9，4607（2018）。27. L. Li、J. Wang、L. Kang、W. Liu、L. Yu、B. Zheng、M. L. Brongersma、D. H. Werner、S. Lan、Y. Shi、Y. Xu 和 X. Wang，“集成石墨烯-硅光电探测器的手性等离激元超表面实现单片全斯托克斯近红外偏振测量”，《ACS 纳米》14，16634–16642（2020）。28. P. J. Winzer 和 D. T. Neilson，“从规模差异到集成并行化：十年十项挑战”，《光波技术杂志》35，1099–1115（2017）。29. D. A. B. Miller，“用于低能耗信息处理与通信的阿焦耳光电子学”，《光波技术杂志》35，346–396（2017）。30. U. Koch、A. Messner、C. Hoessbacher、W. Heni、A. Josten、B. Baeuerle、M. Ayata、Y. Fedoryshyn、D. L. Elder、L. R. Dalton 和 J. Leuthold，“超紧凑太比特等离激元调制器阵列”，《光波技术杂志》37，1484–1491（2019）。31. G. Soma、W. Yanwachirakul、T. Miyazaki、E. Kato、B. Onodera、R. Tanomura、T. Fukui、S. Ishimura、M. Sugiyama、Y. Nakano 和 T. Tanemura，“ 采用纳米金属偏振片的超宽带表面法线型相干光接收机 ”，《 ACS 光子学》 9，2842–2849（2022）。32. T. Umezawa、A. Matsumoto、K. Akahane、A. Kanno 和 N. Yamamoto，“用于提高自由空间光通信接收机光学对准鲁棒性的400像素高速光电探测器”，载于《光纤通信会议》（OFC）2022年会议论文集，论文编号 M4I.3。33. E. Maguid、I. Yulevich、D. Veksler、V. Kleiner、M. L. Brongersma 和 E. Hasman，“光子自旋控制多功能共口径天线阵列”，《科学》352，1202–1206（2016）。34. E. Arbabi、A. Arbabi、S. M. Kamali、Y. Horie 和 A. Faraon，“通过空间复用实现多波长超表面”，《科学报告》6，32803（2016）。35. T. Tanemura、T. Suganuma 和 Y. Nakano，“光子集成直接检测斯托克斯矢量接收机的灵敏度分析”，《光波技术杂志》38，447–456（2020）。36. V. Liu 和 S. Fan，“S4：用于分层周期结构的免费电磁求解器”，《计算物理通讯》183，2233–2244（2012）。37. J. P. Balthasar Mueller、N. A. Rubin、R. C. Devlin、B. Groever 和 F. Capasso，“超表面偏振光学：对任意正交偏振态进行独立相位控制”，《物理评论快报》118，113901（2017）。38. M. Khorasaninejad、W. T. Chen、R. C. Devlin、J. Oh、A. Y. Zhu 和 F. Capasso，“可见光波长下的金属透镜：衍射极限聚焦与亚波长分辨率成像”，《科学》352，1190–1194（2016）。39. M. Khorasaninejad、A. Y. Zhu、C. Roques-Carmes、W. T. Chen、J. Oh、I. Mishra、R. C. Devlin 和 F. Capasso，“可见光波长下的偏振不敏感超透镜”，《纳米快报》16，7229–7234（2016）。40. S. Molesky、Z. Lin、A. Y. Piggott、W. Jin、J. Vucković 和 A. W. Rodriguez，“纳米光子学中的逆向设计”，《自然·光子学》12，659–670（2018）。41. M. Mansouree、A. McClung、S. Samudrala 和 A. Arbabi，“利用伴随优化进行大规模参数化超表面设计”，《ACS 光子学》8，455–463（2021）。42. T. Umezawa、T. Sakamoto、A. Kanno、S. Nakajima、A. Matsumoto、N. Yamamoto 和 T. Kawanishi，“利用二维光电探测器阵列实现400 Gbps空分复用光无线通信”，载于《欧洲光通信会议》（ECOC）2018年会议论文集，论文编号 Th2.31。43. Y. Mori、C. Zhang 和 K. Kikuchi，“适用于数字相干光接收机的有限冲激响应滤波器新型配置，可容忍高阶正交振幅调制信号中的载波相位波动”，《光学快报》20，26236–26251（2012）。44. M. S. Faruk 和 K. Kikuchi，“光学正交振幅调制相干接收机前端的同相/正交失衡补偿”，《IEEE 光子学杂志》5，7800110（2013）。45. Y. Yi、T. Umezawa、A. Kanno 和 T. Kawanishi，“50 GHz高光电流PIN 光电二极管及其热效应”，载于《光电子与通信会议》（ OECC）和《光子交换与计算会议》（PSC）2022年会议论文集，论文编号 WD2-2。46. T. Umezawa、A. Kanno、K. Kashima、A. Matsumoto、K. Akahane、N. Yamamoto 和 T. Kawanishi，“110 GHz以上无偏置工作的单行载流子光电二极管及其在高波特率固定光纤通信和W波段光子无线通信中的应用”，《光波技术杂志》34，3138–3147（2016）。

紧凑且可扩展的使用介电超表面的偏振自相干接收器：补充信息

GO SOMA，[1,4] YOSHIRO NOMOTO，[2] TOSHIMASA UMEZAWA，[3] YUKI Y OSHIDA，[3]YOSHIAKI NAKANO，[1] 和 TAKUO TANEMURA[1,5]

[1]东京大学工学院，日本东京文京区本乡7-3-1[2]滨松光子学株式会社中央研究实验室，日本静冈县滨松市滨北区平口5000[3]日本信息通信研究机构（NICT），日本东京小金井市贯井北町4-2-1[4]soma@hotaka.t.u-tokyo.ac.jp，[5]*tanemura@ee.t.u-tokyo.ac.jp*

S1. $\boldsymbol{D_u(\varphi_u, \varphi_v)}$ 和 $\boldsymbol{D_v(\varphi_u, \varphi_v)}$ 的推导

通过严格耦合波分析模拟，我们得到 $t_u(D_u, D_v)$ 和 $t_v(D_u, D_v)$，它们分别描述沿 u 轴和 v 轴偏振的线偏振光通过椭圆形硅纳米柱阵列时的复透射率，该阵列的主轴长度为 D_u 和 D_v。模拟强度$|t_u|^2$ 和$|t_v|^2$ 以及相位 $\arg(t_u)$ 和 $\arg(t_v)$ 如图 S1(a) 和 (b) 所示。根据这些结果，我们利用以下方程 [1] 推导出所需的 $D_u(\varphi_u, \varphi_v)$ 和 $D_v(\varphi_u, \varphi_v)$，以获得所需的相移 (φ_u, φ_v)：

$$(D_u(\varphi_u, \varphi_v), D_v(\varphi_u, \varphi_v)) = \arg\min_{(D_u, D_v)} \left[\left| t_u(D_u, D_v) - e^{i\varphi_u} \right|^2 + \left| t_v(D_u, D_v) - e^{i\varphi_v} \right|^2 \right].$$

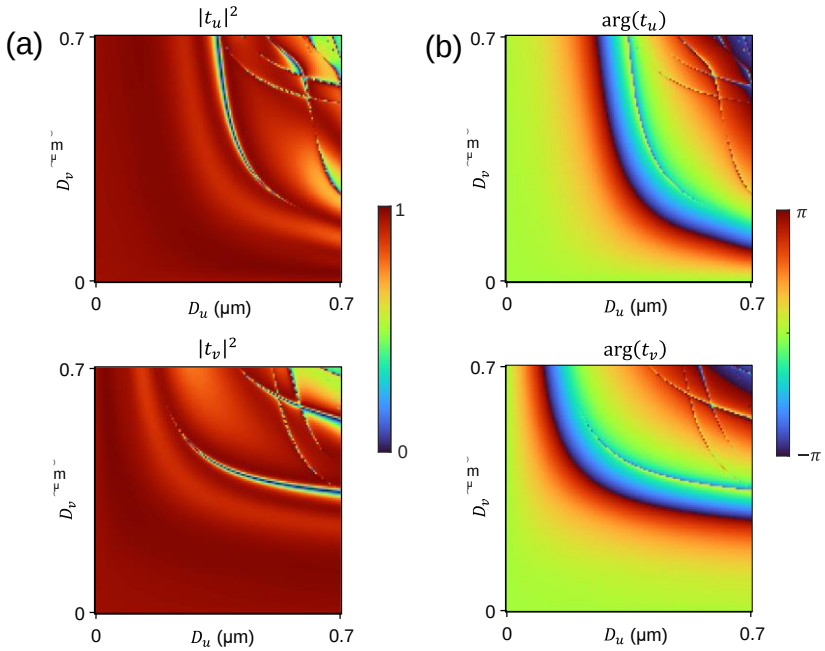


图 S1。透射系数随 D_u和 D_v 变化的模拟强度 (a) 和相位 (b)。

S2. 圆偏振光超原子阵列所产生相移的推导 **t**

描述无损硅纳米柱阵列透射率的琼斯矩阵可以…… e
可写为

$$\mathbf{J} = \mathbf{R}(\theta)\begin{pmatrix} e^{i\varphi_u} & 0 \\ 0 & e^{i\varphi_v} \end{pmatrix}\mathbf{R}(-\theta) = \begin{pmatrix} e^{i\varphi_u}\cos^2\theta + e^{i\varphi_v}\sin^2\theta & (e^{i\varphi_u} - e^{i\varphi_v})\sin\theta\cos\theta \\ (e^{i\varphi_u} - e^{i\varphi_v})\sin\theta\cos\theta & e^{i\varphi_u}\sin^2\theta + e^{i\varphi_v}\cos^2\theta \end{pmatrix}.$$

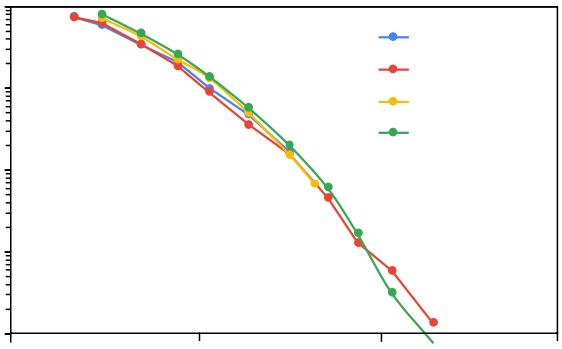
其中，φ_u 和φ_v 分别表示椭圆形纳米柱主轴方向上偏振分量的相移，$\mathbf{R}$（θ）是旋转角为θ的旋转矩阵。这里假设输入光波为圆偏振光，其琼斯矢量写作$\boldsymbol{E}_{r,\ l} = 1/\sqrt{2}(1, \pm i)^T$。于是，输出琼斯矢量可写为

$$\mathbf{J}\boldsymbol{E}_{r,l} = \frac{e^{i\varphi_u} + e^{i\varphi_v}}{2}\boldsymbol{E}_{r,l} + \frac{e^{i\varphi_u} - e^{i\varphi_v}}{2}e^{\pm i2\theta}\boldsymbol{E}_{l,r}.$$

因此，当超原子充当半波片时，即$\varphi_v = \varphi_u + \pi$，输出琼斯矢量变为$e^{i(\varphi_u \pm 2\theta)}\boldsymbol{E}_{l,\ r}$。换言之，施加于右旋和左旋圆偏振波的相移分别为（$\varphi_r$，$\varphi_l$）=（$\varphi_u + 2\theta$，$\varphi_u - 2\theta$），而输出偏振手性则发生反转。

S3. 三路B-PD与四路S-PD配置的比较

为比较三路B-PD与四路S-PD配置所得的结果，我们使用图4(a)所示的两种实验装置，采用15 吉波特 16 阶正交振幅调制信号进行了自相干传输实验。测得的误码率曲线如图S2所示。由于误码率受光信噪比（OSNR）限制，因此两种情况下得到的结果相同。



图S2. 使用三路B-PD和四路S-PD配置装置测得的15 GBd 16QAM信号误码率曲线。

参考文献

1. A. Arbabi、Y. Horie、M. Bagheri 和 A. Faraon，“用于完全控制相位和偏振、具有亚波长空间分辨率和高透射率的介电超表面”，《自然·纳米技术》**10**，937–943（2015）。