arXiv:2303.00679v1 [physics.optics] 1 Mar 2023

采用光学处理的快速散斑波长计设计

LUCAS R. MENDICINO,[1,2] 和 CHRISTIAN T. SCHMIEGELOW[1,2,*]

[1] 布宜诺斯艾利斯大学，精确与自然科学学院，物理系。阿根廷布宜诺斯艾利斯。[2] *CONICET* - 布宜诺斯艾利斯大学，布宜诺斯艾利斯物理研究所（*IFIBA*）。阿根廷布宜诺斯艾利斯[*]*schmiegelow@df.uba.ar*

摘要： 我们提出一种基于散斑的波长计设计方案，兼具高光谱分辨率和快速响应时间。该器件采用相干长度较短的固定色散介质作为光学预处理器，并以一系列可编程光学元件作为后处理器。预处理器生成具有给定相关长度的复杂散斑图样，随后后处理器将光场转换为简单的二进制图样，其强度与波长相对于参考值的偏差成正比。我们展示了如何构建一种经过训练后，能够在平衡探测器上产生与波长成正比的电信号的器件。此外，我们还证明，使用相关长度处于皮米范围内的预处理器，该器件可实现从亚皮米到纳米级的分辨率。更一般地说，我们的结果表明，采用固定的高光谱分辨率预处理器，可以提升低光谱分辨率可编程光学后处理器的性能。

© 2023 Optica出版集团

1. 引言

现代波长计基于干涉原理，可分为两类：一类以随机方式产生衍射（基于散斑），另一类采用有序结构（基于干涉图样）。在这两种情况下，衍射图样通常由探测器阵列读取，随后经数字化处理以确定波长。这一环节限制了读出速度；目前市售波长计的读出时间通常远超毫秒，即使使用高速读出相机，基于散斑的波长计用于激光稳频时所达到的频率也低于 50 kHz [1]。在此，我们提出以光学后处理器和一对平衡式二进制探测器取代复杂的探测与数字后处理，从而轻松实现微秒以下的工作时间尺度。这对于激光频率稳定尤为重要，因为此类波长计不仅能够测定绝对频率，还可将稳定时间尺度推进至 MHz 范围，分辨率远优于皮米级，可与法布里-珀罗腔相媲美。此外，我们的构想还可立即扩展，用于生成可编程波分复用器。

基于散斑的波长计已发展出多种产生光学随机性的方法 [2,3]。例如，多模光纤 [4] 和积分球 [1]，其相关长度约为几皮米。着眼于商业应用，一些片上研发在诸如倏逝场耦合多模光纤 [5]和定制的无序光子芯片 [6,7]等设计中取得了出色成果。近期的进展包括将集成多模波导连接至光子灯笼 [8]，甚至将微环谐振器与纳米尺度干涉仪耦合 [9]，并将其用作紧凑型集成波长计。这些技术实现了从几皮米到几阿米的分辨率，但系统复杂度也随之增加。然而，随着复杂度提高，图像处理所需的时间也会增加，这限制了基于散斑的稳频系统的发展。

为了从散斑图样推断光的波长，人们采用了多种线性代数分析技术，例如传输矩阵 [2], 、主成分分析 [1], 、庞加莱描述符 [10] ，近些年来甚至还采用了深度学习技术来实现同一目的 [11]。这些技术需要一个校准阶段，将多个散斑图样与多个已知波长相关联，并以数字形式存储这些信息。随后进行实际测量时，会将生成的图样与已存储的图样进行比较，算法输出与该图样对应的波长。这些步骤需要一定的处理时间，而光学处理器可以大幅缩短处理时间。

在本研究中，我们提出以光学后处理器取代数字后处理器。光学后处理器由一组可编程相位板构成，经训练后可将复杂的、依赖波长的散斑图样转换为与相对于所选波长的波长偏差 $\Delta\lambda^{\prime\prime}$ 成正比的二元输出 λ_0。随后可通过平衡光电探测器读取该信号，从而实现波长的电读出，其时间常数仅受单个探测器或平衡探测器带宽的限制。

为训练可编程平面，我们采用波前匹配技术 [12]。该技术已展现出高效地将多种不同输入光束转换为多种指定输出光束的能力。例如，研究表明，N种不同的拉盖尔-高斯光束可以被分选为在空间上彼此分离的输出光束，且这些光束均具有高斯分布 [13]。近期利用空间光调制器进行光分解的研究成果包括：解析垂直腔面发射激光器（VCSEL）输出光的空间、光谱、时间和偏振态 [14], ；采用经改进的波前匹配技术设计并制造超宽带光学混合器 [15] ；以及设计混合模式与波分复用器件 [16]。

可编程空间光调制器也可以训练为光学处理器。此外，使用维度高于可编程平面的随机介质，不仅能够对整个光学处理器实现更高程度的控制和更强的灵活性，还能更好地抵御制造缺陷。具体而言，已有研究表明，将多模光纤与一组可编程平面结合使用，可以在维度最高达 7 [17] 的光子模式上实现任意门。

在这项工作中，我们将在第2节展示，波前匹配技术可用于训练一组空间光调制器，以区分具有相同空间结构但频率不同的光束，并说明加入固定的随机介质作为预处理器后，如何提高可编程后处理器的分辨率。在第4节中，我们将展示如何利用这些理念构建一台具有亚皮米分辨率和宽光谱响应的完整波长计。

2. 方法

图1(a)展示了所提出的波长计实现方案。该方案包含两个主要且相互独立的部分：散斑预处理器和光学后处理器。为了测试器件的性能，我们使用通过 Light Pipes [18] for Python 库实现的相干光束传播法，对其行为进行了仿真。

在预处理阶段，我们生成一个散斑图样。预处理器由一个方形波导建模，其中设有等间距的扩散平面。扩散平面的作用是使光在经过每个平面时，其波前随机化。通过调整平面间的特征距离、平面数量以及它们之间的距离，可以生成具有不同相关长度的散斑图样。只要输出光是由具有某种特征相干长度的随机自干涉产生的散斑图样，就可以采用上述任意一种实验方法来实现这种预处理器。在此，我们使用 $N = 50$ 个截面为。096 mm × × 4。096 mm、彼此相隔 50 cm 的平面，并采用尺寸为 512 μm × × 512 μ m 的特征随机散射相位元件。此外，我们假设

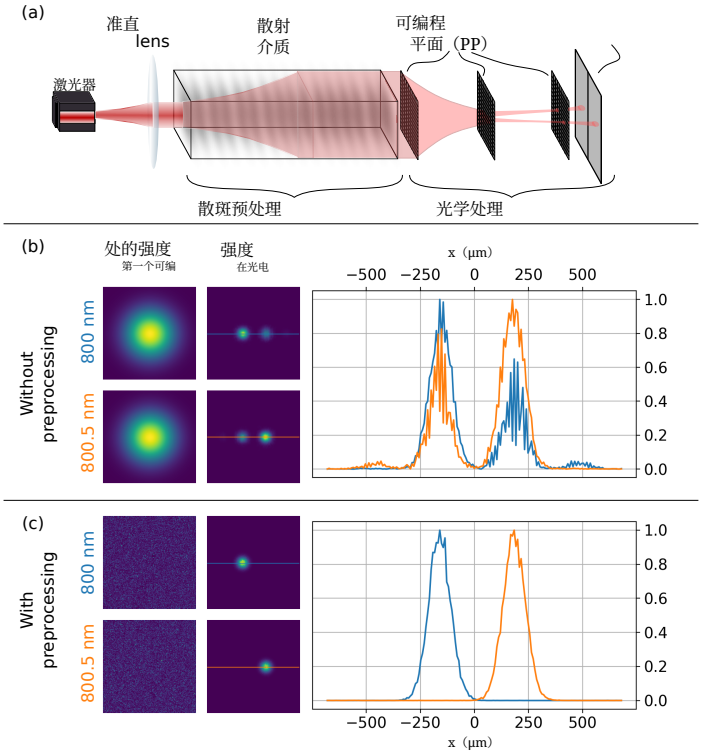


图1。方法总体概览。（a）所提出装置的方案。激光束经过准直后传播通过散射介质，从而生成散斑图样；这是由于波前随机化产生的光发生自干涉所导致的。随后，光传播通过三个可编程平面，这些平面经过预先训练，可将波长为 λ_0 的光发送至 PD 的一侧，并将波长为 $\lambda_0 + \Delta\lambda$ 的光发送至另一侧。（b、c）在 $\Delta\lambda = 0.5$ nm 情况下对该方法的演示。在（b）中，由于不存在散射介质，光未经过预处理，因此各平面使用高斯光束进行训练；在（c）中，光经过预处理，因此到达第一个可编程平面的光呈现散斑图样。第一列为到达第一个可编程平面的光强，第二列为光电探测器（PD）平面处的强度，即输出结果。右侧图中的曲线表示沿 PD 图中所绘直线得到的强度。蓝色和橙色曲线分别表示 800 nm 和 800.5 nm。可以看出，使用散斑发生器作为光预处理器，能够以 PD 处更清晰的信号识别入射光的波长。

到达仿真边界的光会向内反射，以此考虑无损条件。这样，通过改变平面间距、平面数量以及随机散射相位元件的尺寸等参数，我们可以获得相关长度从数百 fm 到数百 pm 的散斑图样。

在光学后处理阶段，我们准备了三个可编程平面，其像素面积选为 ~ 60 μm^2, , 与典型商用空间光调制器相近；每个像素的相位都可以通过设置外部电势进行编程。考虑到可能的实验实现，我们尝试使用尽可能少的平面。最终我们使用了 3 个平面，因为对于 1 个平面，波前匹配算法的波前往返传播（见第 2.1 节）

无法实现；而对于 2 个平面，每个平面中的传播变化过于突兀，算法并不总能收敛到预期的波前。可编程平面之间的距离为 9 cm，其尺寸为 4.096 mm $\times$ 4.096 mm。距离更长时，收敛效果更好，但考虑到实验实现，我们尝试使系统尽可能短。

最后，检测阶段由一个平衡光电探测器组成，该探测器通过测量网格两半部分上的强度进行仿真。

2.1. 后处理器训练

我们用于训练可编程平面的方法称为波前匹配 [12],，它可以通过选择一组可编程相位平面上的空间结构化相位图案，将给定的入射波前转换为输出端所需的波前。通过将入射波前和反向传播的目标波前传播至每个平面，并在每个像素处将平面的相位设置为匹配二者的相位差，从而以迭代方式修改各平面的相位。例如，J. Carpenter 及其同事曾使用该技术，根据光的空间结构，按照拉盖尔（厄米）-高斯模式基对光进行分选 [13]。一系列教程视频清晰地展示了这项技术 [19]。

3. 概念验证：后处理器性能

本节将使用所提出的方法量化预处理器和后处理器的分辨本领。具体而言，我们将给出一个明确的示例，说明加入预处理器如何提高整个器件的波长灵敏度。

我们首先只考虑后处理器及其区分两种波长的性能。具体而言，对于空间结构相同的输入光束，我们采用三可编程平面上的波前匹配技术来区分两种不同波长。作为目标光束，我们使用分别以平衡光电探测器一侧为中心的高斯光束。在 800 nm 附近，我们测得，独立后处理器能够分辨的最小波长差约为 $\Delta\lambda = 1$ nm。波长差高于该值时，区分效果几乎完美，超过 99% 的光都进入目标模式。然而，接近这一极限时，会有相当多的光照射到错误的探测器上。例如，图1 (b) 展示了这样一种情况：第一可编程平面上的两个入射波前都是高斯光束，其波长分别为 $\lambda = 800$ nm 和$\lambda = 800$。5 nm。此时只能部分区分这两个波长，从二维强度分布或图像中心的剖面中可以看出这一点。光电探测器显示，训练所用波长之间存在较大的互相关，这表明相差$\Delta\lambda = 0$。5 nm 的波长已接近后处理器的分辨极限。

接下来，我们将预处理器纳入传播和训练算法中。图1 (c) 展示了一个示例：光线先经过散射介质生成散斑图样，再到达可编程平面。我们使用与之前相同的参数：$\lambda = 800$ nm 和 $\Delta\lambda = 0.5$ nm。现在可以看到，这两个波长几乎不会产生杂散互相关，因此能够被区分。进入错误的探测器的功率百分比低于 0.1%。这个示例表明，随机预处理降低了两个输入光束之间的互相关（这两个光束的波长差低于后处理器能够准确分辨的极限），从而提高了后处理器的波长灵敏度。

如前所述，该方法能够以最佳方式判别两个波长，这两个波长之间的间隔约为预处理器的相干长度 l_c。如果要在高于或低于相干长度的范围 $\Delta\lambda^{tr}$ 内训练后处理器，则必须注意确保波长判别准确；下一节将对此进行讨论，并说明如何利用这些结果构建宽范围波长计，或者等效地，构建可调谐波分复用器。

4. 波长计设计：多范围策略

波长计不仅应能判别两个特定波长，还应能确定给定范围内的未知波长。对于上述方法，如果入射到波长计的波长超出两个经过训练的目标波长，器件将无法给出明确结果。要确定器件能够测量的波长范围，可以让器件在不同的后处理器配置（即不同的训练波长）之间迭代，直到获得肯定的测量结果并确定未知波长。为加快这一搜索过程，最好让器件能够以可变精度工作。这样，搜索未知波长时，可以先采用较宽的精度范围，然后通过提高器件的分辨率来缩小测量范围。

在本节中，我们将介绍如何训练后处理器，以不同精度确定波长。为扩展波长计的最佳工作精度范围，我们研究了两种训练方案。一种方案是仅使用两个波长训练后处理器，另一种方案是使用多个波长进行训练，这些波长在训练范围的两个极值之间等间隔分布。为了表征这两种策略，我们采用具有不同相关长度的散斑图样，以及不同的训练波长范围。在以下各小节中，我们展示多个参数范围下的仿真结果，从而确定两种训练方法的极限，并说明应如何选择最佳配置。

4.1. 双波长方案

第一种方案是训练各平面，使其仅识别波长 λ_0 和$\lambda_0 + \Delta\lambda^{tr}$这一对波长，类似于上一节所述的方法。

我们将探测器之间的归一化强度差定义为

$$\Delta I = \frac{I_R - I_L}{I_R + I_L}, \tag{1}$$

其中， I_R 和 I_L 分别是右侧和左侧探测器中的总强度。在图2(a)中，我们展示了双波长训练方案下、固定训练区间$\Delta\lambda^{tr}$ = 500 皮米时，探测器之间的强度差随波长变化的结果。随着所生成散斑的相关长度 l_c 发生变化，可以观察到 ΔI 在该区间内的行为发生了定性变化。当 $l_c \lesssim 2\Delta\lambda^{tr}$ 时，只能在接近任一训练波长的区域内，从 ΔI 推断出 $\Delta\lambda$ 的信息；两者之间存在一个响应平坦区域，在该区域内无法将 ΔI 与 $\Delta\lambda$对应起来，如图2(a)顶部的3条曲线所示。

当 l_c 增大时，平坦区域会出现斜率，因此可以根据该信号区分 $\Delta\lambda$范围内的所有波长，如图 2 (a) 中间的曲线所示。相干长度更大时，信号的可见度会降低，如底部两条曲线所示。在此范围内，当相干长度大于训练区间 $l_c \gtrsim 2\Delta\lambda^{tr}$ 时，双波长方案可以正常工作，但灵敏度会发生变化。

为了表征该方案在工作范围内的灵敏度，我们记录以下差值 of 训练范围两端处探测器上的归一化强度：

$$\Delta I_{max} = I(\lambda_0) - I(\lambda_0 + \Delta\lambda^{tr}). \tag{2}$$

在图 2(b) 中，我们展示了仿真中获得的灵敏度 ΔI_{max} 与训练范围的函数关系，其中 l_c = 4.7 pm 和 l_c = 47.2 pm 对应 λ_0 = 800 nm。双波长训练的结果以圆圈表示。我们用函数$\Delta I_{max}(\Delta\lambda) = (\Delta\lambda)^{\alpha} e^{\beta}$拟合渐近行为，其中 β表示截距， α表示斜率。参数α 对于表征波长计具有重要意义，因为其值包含了关于 $\Delta\lambda^{tr}$ 变窄时 ΔI_{max} 衰减程度的信息。对若干 l_c 的拟合得到的斜率 α 彼此相近，我们报告其平均值为 $\alpha_{2\lambda} = 2.02 \pm 0.03\ \mathrm{fm}^{-1}$。

所述双波长方案仅适用于 $\Delta\lambda^{tr} \lesssim 2l_c$；随着 $\Delta\lambda^{tr}$ 小于 l_c，灵敏度会降低。在这种情况下，电学放大信号有助于将分辨率提高几个数量级，但通常会受到带宽和噪声的限制。另一方面，为了突破这一较低限值，扩展波长计的功能，使其适用于 $\Delta\lambda^{tr} \gtrsim 2l_c$的更大范围，我们将在下一节讨论一种多波长训练方法。

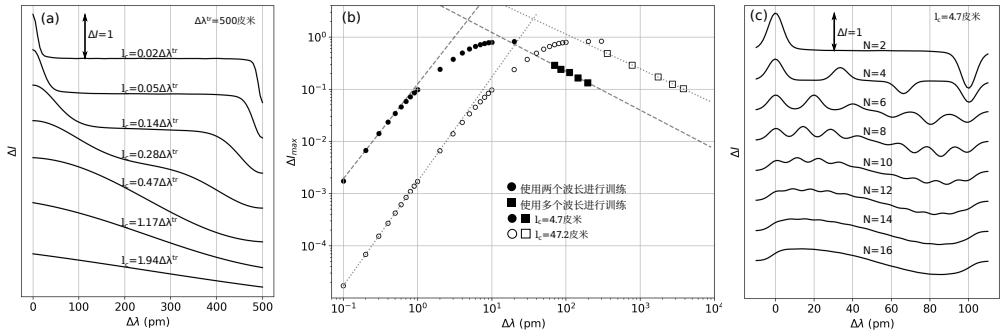


图 2. 仿真结果。（a）仅使用两个波长进行训练时仿真获得的典型结果（本例中为 800 nm 和 800.5 nm）。 $\Delta I = 1$ 用于在相关长度增大而曲线收缩时，为不同曲线设置一个尺度。（b）波长计的表征结果，其中采用两种训练方案来扩展波长计的动态范围。圆点表示仅使用两个波长训练得到的结果，方点表示使用足够多的波长进行训练得到的结果，使得训练波长之间的曲线平滑；如（c）中 $N = 16$所示。我们针对预处理器输出端的两种不同相关长度对系统进行了表征，并获得了相近的波长计性能，该性能由各曲线拟合至渐近线所得点划线的斜率 α 给出。（c）训练阶段使用两个以上波长时仿真获得的典型结果。在本例中，对于总数为 $N = 16$ 的训练波长，波长与探测器测得的归一化强度差之间存在单调关系。

4.2. 多波长方案

在此，我们通过使用多个波长，而非仅两个，来扩展后处理器的训练范围。提出这一方案的目的是避免在此范围内为获得有效信号而观测到的平坦响应 $N = 2$ when$\Delta\lambda^{tr} \gtrsim 2l_c$。

作为示例，图 2(c) 展示了在训练范围固定为 $\Delta\lambda^{tr} = 100$ pm、相干长度为 $l_c = 4$。7 pm 的情况下，随着训练波长数量 N 从 2 增至 16 而获得的 $\Delta I(\Delta\lambda)$。训练波长在 λ_0 和 $\lambda_0 + \Delta\lambda^{tr}$ 之间等间距选取。可以看出，当训练波长数量达到一定值（本例中 $N = 16$）时，响应变为单调响应，不仅消除了波长无法确定的平坦区，还会在指定范围内产生与波长差成正比的输出信号。所需的训练波长数量 N 取决于比值 $\Delta\lambda^{tr}/l_c$，可通过奈奎斯特–香农采样定理粗略确定。该比值越大，所需的波长数量也相应越多。

由此可见，该方案使我们能够训练一个区间，在该区间内 $\Delta\lambda^{tr} \gg l_c$，并且在训练波长之间的整个范围内仍能获得有用信息。同样，随着训练范围相对于相干长度增大，信号的灵敏度会降低。这一点在图 2(b) 的方块中有所体现。在这种情况下，其渐近行为比双波长方案平缓得多，并且仍大致独立于预处理器的相干性

长度，现在我们得到 $\alpha_{N\lambda} = -0。61 \pm 0。06$ 皮米$^{-1}$。我们还注意到，在这种情况下，能够明确地将波长与强度对应起来的区间 $\Delta\lambda$略短于训练区间 $\Delta\lambda^{tr}$；这可以通过采用大于目标区域的训练区域来修正。

5. 讨论

我们提出了两种适用于 $\Delta\lambda^{tr}$ 不同区域的训练方案：一种是在 $2\Delta\lambda^{tr} \lesssim l_c$ 时适用的双波长方案，以及一种在 $2\Delta\lambda^{tr} \gtrsim l_c$ 时适用的多波长方案。以这种方式构建的波长计，其动态范围首先取决于测量 ΔI 时所能达到的测量分辨率。对于 10^{-3} 的保守灵敏度，该方法在相干范围上下超过两个数量级的范围内均适用。如前所述，可以通过训练不同的范围来扩展该范围，并通过迭代确定波长所处的范围。

我们的模拟表明，所观察到的灵敏度下降是光学后处理阶段的特性，与预处理器中生成的散斑的相关长度无关。我们还观察到，波长计的动态范围会随该相关长度 l_c 发生偏移，但其渐近行为大致与之无关。在实践中，l_c 取决于用作预处理器以生成散斑的介质特性，并且可以将其视为常数。

6. 结论

我们介绍了如何构建一种散斑波长计：以固定散射介质作为预处理器，并采用由三个可编程平面组成的可编程光学后处理器，后者通过波前匹配技术进行训练。该器件经过训练后，能够以远超后处理器分辨本领的分辨率测定波长，甚至能够测定超出第一种散射介质相干长度范围的波长。我们提出了一种多范围策略，并分析了两种训练方法：一种在预处理器相干长度以上效果更好，另一种则在其以下效果更好。我们提出的实验方案以光学处理取代数字处理，从而显著缩短了散斑波长计通常所需的测量时间。该方案有望推动散斑波长计类装置在激光频率主动稳定方面迈上新台阶，因为现在测定波长的速度仅受平衡光电探测器带宽和反馈电子设备的限制。

资助。 本研究得到了 Agencia I+D+i 的 PICT 2018 - 3350 和 PICT 2019 - 4349 项目资助、科学技术秘书处、布宜诺斯艾利斯大学 UBACyT 2018 (20020170100616BA) 项目资助，以及 CONICET（阿根廷）的资助。

致谢。 我们感谢 Mikael Mazilu 指引我们参考文献 [1]，并建议以光学处理取代数字处理。我们也感谢 Nicolás Nuñez Barreto 仔细审阅稿件。

利益披露。 作者声明不存在利益冲突。

数据可用性。 本文所述结果所依据的数据目前尚未公开，但可应合理请求向作者获取。

参考文献

1. N. K. Metzger, R. Spesyvtsev, G. D. Bruce, B. Miller, G. T. Maker, G. Malcolm, M. Mazilu 和 K. Dholakia，“利用散斑实现亚飞米分辨率宽带波长计和激光稳频”，《自然·通讯》8，1–8（2017）。2. H. Cao，“散斑光谱仪展望”，《光学杂志》19，060402（2017）。3. Y. Wan, X. Fan 和 Z. He，“基于散斑的光谱分析仪综述”，《光子传感器》11，187–202（2021）。4. B. Redding 和 H. Cao，“利用多模光纤构建高分辨率、低损耗光谱仪”，《光学快报》37，3384 3386 2012–（）。5. B. Redding, S. F. Liew, Y. Bromberg, R. Sarma 和 H. Cao，“倏逝耦合多模螺旋光谱仪”，《Optica》3，956–962（2016）。6. B. Redding, S. F. Liew, R. Sarma 和 H. Cao，“基于无序光子芯片的紧凑型光谱仪”，《自然·光子学》7，746–751（2013）。7. W. Hartmann, P. Varytis, H. Gehring, N. Walter, F. Beutel, K. Busch 和 W. Pernice，“利用定制无序结构实现具有单光子灵敏度的宽带光谱仪”，《纳米快报》20，2625–2631（2020）。8. D. Yi, Y. Zhang, X. Wu 和 H. K. Tsang，“集成多模波导与光子灯笼用于散斑光谱学”，《IEEE量子电子学杂志》57，1–8（2020）。9. Z. Zhang, Y. Li, Y. Wang, Z. Yu, X. Sun 和 H. K. Tsang，“在氮化硅平台上以 776 nm 波长利用线性相干集成网络实现紧凑型高分辨率散斑光谱仪”，《激光与光子学评论》15，2100039（2021）。10. L. O’Donnell, K. Dholakia 和 G. D. Bruce，“利用散斑的庞加莱描述符高速测定激光波长”，《光学通讯》459，124906（2020）。11. R. K. Gupta, G. D. Bruce, S. J. Powis 和 K. Dholakia，“深度学习赋能的高动态范围激光散斑波长计”，《激光与光子学评论》14，2000120（2020）。12. Y. Sakamaki, T. Saida, T. Hashimoto 和 H. Takahashi，“基于波前匹配法的新型光波导设计”，《光波技术杂志》25，3511–3518（2007）。13. N. K. Fontaine, R. Ryf, H. Chen, D. T. Neilson, K. Kim 和 J. Carpenter，“拉盖尔–高斯模式分选器”，《自然·通讯》10，1–7（2019）。14. M. Plöschner, M. M. Morote, D. S. Dahl, M. Mounaix, G. Light, A. D. Rakić 和 J. Carpenter，“对光进行空间层析成像，并在时间、光谱和偏振维度上实现分辨”，《自然·通讯》13，1–10（2022）。15. Y. Zhang, N. K. Fontaine, H. Chen, R. Ryf, D. T. Neilson, J. Carpenter 和 G. Li，“利用多平面光转换实现超宽带偏振不敏感光学混合器”，《光波技术杂志》38，6286–6291（2020）。16. Z. Wei, A. Kong, J. Hu, T. Lei 和 X. Yuan，“用于波长-模式混合复用的并行阵列波导光栅”，《光学快报》47，4311–4314（2022）。17. G. Marcucci, D. Pierangeli, P. W. Pinkse, M. Malik 和 C. Conti，“通过机器学习在无序计算储备池中编程多级量子门”，《光学快报》28，14018–14027（2020）。18. G. Vdovin, F. van Goor, Guyskk 和 L. Doyle，“Light Pipes”，https://github.com/opticspy/ lightpipes。19. “拉盖尔–高斯模式分选器（技术版）”，https://www.youtube.com/watch?v= TqAr4UFtoqw。 [在线；访问日期：2022]年9月6日。