

## 散射光场调控方法及应用(特邀)

倪枫超<sup>1</sup>, 刘海港<sup>1\*</sup>, 陈险峰<sup>1,2\*\*</sup><sup>1</sup>区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海交通大学物理与天文学院, 上海 200240;<sup>2</sup>上海量子科学研究中心, 上海 201315

**摘要** 波前整形方法通过改变入射光的相位模式分布来补偿由散射引起的相位畸变,使散射光子可以被有效地利用,从而实现散射光场调控。通过散射光场调控可以将有害的散射介质变成可控的光学元件,实现光的定向传输、动态检测等功能,为其在各领域中的应用提供了一种强大的工具。本文在介绍光场散射特性及其调控方法原理的基础上,介绍了散射光场空间、偏振、频率、能量和轨道角动量等自由度的调控方法,随后重点介绍了散射光场调控在成像、通信、非线性光学、量子光学、光学检测、集成光学和光计算等领域的最新研究进展。

**关键词** 物理光学; 散射; 光场调控; 波前整形; 传输矩阵

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231858

## 1 引言

光波在均匀介质中将根据其波动方程进行无失真传播,光的这个特性使其被广泛应用于能量和信息的传输。然而,现实世界不存在绝对均匀的介质,在光传播的各种介质中存在着各种缺陷和杂质,尤其是完全无序的介质。散射介质内的微小颗粒会使光波偏离原本的传播方向,导致光场变得紊乱而形成散斑<sup>[1]</sup>,从而阻碍了能量传输和信息传递。早期,人们认为散射是不可逆的,为了校正散射引起的畸变,传统方法大多依赖于从散射光子中提取出弹道光子<sup>[2-4]</sup>。然而,这种技术所依赖的弹道光子随着传播距离的增加呈指数式衰减,在达到一定深度后难以从散射光子中提取弹道光子,因此基于弹道光子的散射校正只适用于弱散射介质。1990年, Freund<sup>[5]</sup>发现散射过程是可调控的,而随后的超声波时间反转实验<sup>[6]</sup>使人们意识到光的散射也是可逆的。

随着空间光调制器、数字微反射镜等空间调制器件的飞速发展,以较高精度实现光的空间调制成为可能。2007年, Vellekoop 和 Mosk<sup>[7]</sup>基于空间光调制器提出一种可以补偿强散射效应的里程碑式新技术——波前整形方法,它可以通过优化输入光的波前来预先补偿光散射导致的波前畸变<sup>[8]</sup>,故散射光场的调控成为可能。此外,使用传输矩阵(TM)表征光在复杂介质中的传播过程也得到证实<sup>[9-11]</sup>。短短十几年,基于波前整形技术的散射光场调控已经得到了飞速发展,并

在许多领域中得到了广泛应用。例如,通过使用波前整形方法来补偿光散射效应,可以在强散射介质中实现远低于传统透镜衍射极限的光聚焦<sup>[12]</sup>,进一步实现极大透射深度的高分辨成像。除了成像领域,散射光场调控可以将本身有害的散射介质转化为各种光学元件,如分束器<sup>[13]</sup>、角动量产生和转换器<sup>[14-15]</sup>、偏振控制器<sup>[16-17]</sup>等。在通信领域,通过散射光场调控可以增大光接收器接收的散射光强度,以较低的功耗实现高速的非视域通信<sup>[18]</sup>。此外,通过散射光场调控可以对多模光纤的出射场进行模式选择<sup>[19-20]</sup>,以及调控非线性输出场的光谱<sup>[21]</sup>。

本文将围绕散射光场调控这一主题,介绍相关领域的研究进展,突出散射光场调控在各领域的新应用研究。首先,介绍光场散射特性,以及基于传输矩阵、反馈型波前整形(FBWS)、光学相位共轭(OPC)和人工智能等的散射及其光场调控方法;然后,介绍散射光场空间、偏振、光谱、能量和轨道角动量等多个自由度的调控方法;最后,介绍散射光场调控在成像、通信、非线性光学、量子光学、光学检测、集成光学和光计算等领域的研究进展。

## 2 光场散射特性及其调控方法介绍

## 2.1 光场散射特性

介质对于光波的散射程度可以用传输平均自由程(TMFP)表示,即光波在传播方向发生随机变化前经过的平均距离。当光波的传输距离在一个传输平均自

收稿日期: 2023-11-29; 修回日期: 2023-12-22; 录用日期: 2023-12-29; 网络首发日期: 2024-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(12192252, 12374314, 12004245)

通信作者: \*liuhaigang@sjtu.edu.cn; \*\*xfchen@sjtu.edu.cn

由程内时,弹道光子占据主导地位,此时可以直接利用光场进行点对点成像;当光波的传输距离大于一个传输平均自由程时,光波在介质内发生随机行走,光信号中的弹道光子迅速衰减,散射光子占据主导地位,此时在成像平面接收到一幅随机图案,即散斑。依据散射过程中光的频率是否改变,将散射分为弹性散射和非弹性散射。弹性散射是线性散射,在散射过程中光的频率不变。根据光波波长与散射颗粒大小的相对关系,弹性散射被进一步细分为瑞利散射<sup>[22]</sup>和米氏散射<sup>[23]</sup>。非弹性散射是指在散射过程中光子与散射颗粒发生能量交换,从而导致光子的频率发生变化。常见的非弹性散射主要包括拉曼散射<sup>[24]</sup>、布里渊散射<sup>[25]</sup>以及其他非线性散射<sup>[26]</sup>(倍频、和频、差频等)。

#### 1) 瑞利散射

瑞利散射是指当光照射到直径远小于其波长(小于波长的1/10)的微粒时所发生的散射现象。瑞利散射的散射强度呈对称分布,沿着初始传播方向或相反传播方向的光最强,而与初始传播方向成90°的光最弱。此外,散射光的强度与光频率的4次方成正比。因此,人们观察到的海水和天空呈现蓝色的现象都是由光的瑞利散射引起的。

#### 2) 米氏散射

散射颗粒的大小与光波波长相当时所发生的散射称为米氏散射。相较于瑞利散射,米氏散射的方向性更强,其散射光强主要集中在前向散射。米氏散射主要由大气中的颗粒引起,如尘埃、水滴和烟等,生活中常见的丁达尔效应就是由米氏散射产生的。

#### 3) 拉曼散射

拉曼散射是指光与分子相互作用时,分子振动和转动引起入射光频率发生变化的散射现象。拉曼散射谱线仅由分子振动、转动能级决定,与入射光频率无关,目前拉曼散射光谱常被用于分子结构研究,可以提供样品的化学结构、形态、结晶度等信息。

#### 4) 布里渊散射

一束泵浦光入射到光纤中,由于光纤的电致伸缩效应产生弹性声波,弹性声波会使光纤的折射率发生周期性变化而形成光栅,泵浦光受到声子对光栅的调制而产生频移,此过程即为布里渊散射。因此,布里渊散射本质上是光波与声波在介质中相互作用而产生的非弹性散射。

#### 5) 其他非线性散射

利用介质的二阶非线性实现频率转换(倍频、和频、差频等)目前已经得到广泛的应用。目前,可实现高效非线性转换的方法主要有双折射相位匹配方法和准相位匹配方法,但是这两种相位匹配方法都需要满足严苛的匹配条件。在非线性随机介质中可以实现随机准相位匹配,对泵浦光以及样品制备几乎没有苛刻的要求。目前常见的满足随机准相位匹配的介质包括具有随机畴结构的多晶、非线性粉末等。

## 2.2 散射光场调控方法介绍

波前整形方法可以通过调控入射光波的波前分布实现对由散射效应引起的波前畸变的补偿和校正,是实现散射光场调控的有效方法之一。根据求解校正波前的方式,可将散射光场调控方法分为4类:传输矩阵方法<sup>[9,27-28]</sup>、反馈型波前整形方法<sup>[29-31]</sup>、光学相位共轭法<sup>[32-36]</sup>和人工智能辅助波前整形方法<sup>[37-40]</sup>。

### 1) 传输矩阵方法

光的散射过程似乎是一个随机过程,实际上在散斑的去相关时间内,散射可以被认为是一个确定的过程。输出的散斑场是由散射介质不同传输通道的光波在输出平面相互干涉而产生的。在散射介质中,散射事件可以用一个复值矩阵表征,介质两端的输入光场和输出光场由这个矩阵进行连接。输出场与输入场之间的联系可以表示为: $E_m^{\text{out}} = \sum_{n=1}^N t_{mn} E_n^{\text{in}}$ ,其中 $E_m^{\text{out}}$ 和 $E_n^{\text{in}}$ 分别表示第 $m$ 个出射端和第 $n$ 个人射端的光场, $t_{mn}$ 为传输矩阵 $T$ 的元素,表征 $n$ 处的入射光经过散射之后对 $m$ 处探测点光场的贡献。传统的传输矩阵测量方法一般是利用基于多步相移干涉的全息记录法。在获得介质的传输矩阵后,便可以定制入射场分布来生成期望输出场( $E^{\text{in}} = T^\dagger E^{\text{target}}$ , $E^{\text{target}}$ 为目标输出场),如单点聚焦<sup>[12]</sup>、涡旋光束生成<sup>[14]</sup>、偏振控制<sup>[16]</sup>等,或是根据输出场分布来复原初始入射场信息<sup>[41-42]</sup>。

### 2) 反馈型波前整形方法

传输矩阵的测量对于系统的稳定性有极高的要求,测量过程中一些轻微的抖动或者是外部噪声都将极大地影响所测量传输系统的准确性,从而降低传输矩阵的有效性。反馈型波前整形方法可以很好地补足传输矩阵方法在这一方面的不足,其通过设置目标函数,利用各种迭代算法不断更新入射光波前分布,使目标函数最优化来实现。常被用于反馈型波前整形的优化算法包括逐步顺序算法、连续顺序算法、分割算法、遗传算法<sup>[29]</sup>等。这些算法具有优越的抗噪声能力,很好地弥补了传输矩阵方法对噪声敏感的不足。

### 3) 光学相位共轭法

尽管传输矩阵方法已被证明可以在ms量级的时间内实现散射信号的快速聚焦,但是其需要经历上千次测量,不适用于散斑去相关时间较短的动态介质,如体内生物组织。与传输矩阵方法和反馈型波前整形方法不同,光学相位共轭法可以通过单次测量散射场并直接对散射场进行操控来实现散射信号复原。其测量流程如下:①记录散射场复振幅;②利用相位共轭镜对散射光场进行相位共轭;③经过相位共轭镜的相位共轭场并从相反方向经过散射介质,初始的散射效应被抵消,光线会聚于入射点。目前,光学相位共轭法已被广泛用于生物组织成像<sup>[43]</sup>。

#### 4) 人工智能辅助波前整形方法

尽管上述 3 种方法已得到广泛应用,但是它们通常都需要操控大量独立的调制单元,因此散射光场调控的性能受到极大限制。最近几年,以深度学习为代表的人工智能技术被引入到散射光场调控中,为散射光场调控提供了新的解决方案。深度学习可以建立计算架构并作为一种通用函数。也就是说,从入射光波到输出散斑的转换可以通过一个复杂但数据驱动的网络来学习和连接,这为直接确定所需输出模式的最佳波前分布提供了可能。

### 3 散射光场多自由度调控研究

随着对光散射特性研究的逐渐深入,人们发现散射不仅会影响入射光的波前分布,使其产生散斑图样,还会使偏振、频谱、轨道角动量等维度发生畸变。利用散射光场调控方法,可以实现对散射光场的空间、偏振、频谱、能量和轨道角动量等多种自由度的调控。

#### 3.1 空间调控

将被散射介质散射的光场重新进行空间单点聚焦是散射光场空间调控的基础,同时也是透过散射介质进行光学成像的基础。2007 年, Vellekoop 和 Mosk<sup>[7]</sup>首次通过反馈型波前整形方法实现散射光的单点聚

焦。在此基础上, Vellekoop 等<sup>[12]</sup>通过在传统光学透镜后方放置一块强散射介质,结合波前整形方法获得直径达到传统透镜直径 1/10 的焦斑,实现了突破衍射极限的聚焦,实验装置如图 1 所示,实现的超衍射聚焦效果如图 1(d) 所示。这项工作证明了散射介质的存在可以提高原始成像系统的数值孔径,实现超分辨成像。2010 年, Popoff 等<sup>[9]</sup>首次实现了散射介质的光学传输矩阵测量,根据定制目标输出场并结合光学相位共轭方法,即可产生任意出射场。无论是反馈波前整形方法还是传输矩阵方法,都需要采集输出端的信号作为反馈,而且采集方式都是侵入式。在生物成像领域,为了实现非侵入式聚焦,往往需要内部导星作为反馈信号<sup>[44]</sup>。常见的导星主要包括荧光信号<sup>[45-50]</sup>以及声信号<sup>[51-57]</sup>。2014 年, Katz 等<sup>[50]</sup>利用背向散射装置收集样品产生的双光子荧光信号,并利用迭代算法进行优化,成功地将飞秒激光聚焦在散射介质背后的样品表面,如图 2 所示。除了荧光信号,另一种常被作为导星的是声信号。基于声信号,目前已有许多散射光场调控方案可以实现介质内部的非侵入式聚焦。2014 年, Chaigne 等<sup>[54]</sup>利用光声信号成功测量了散射介质的声光传输矩阵,并实现了在散射介质内部聚焦,如图 3 所示。此外, Lai 等<sup>[53]</sup>利用基于 Grueneisen 弛豫效应的非线性声光反馈,成功将散射光聚焦于单个散射颗粒。

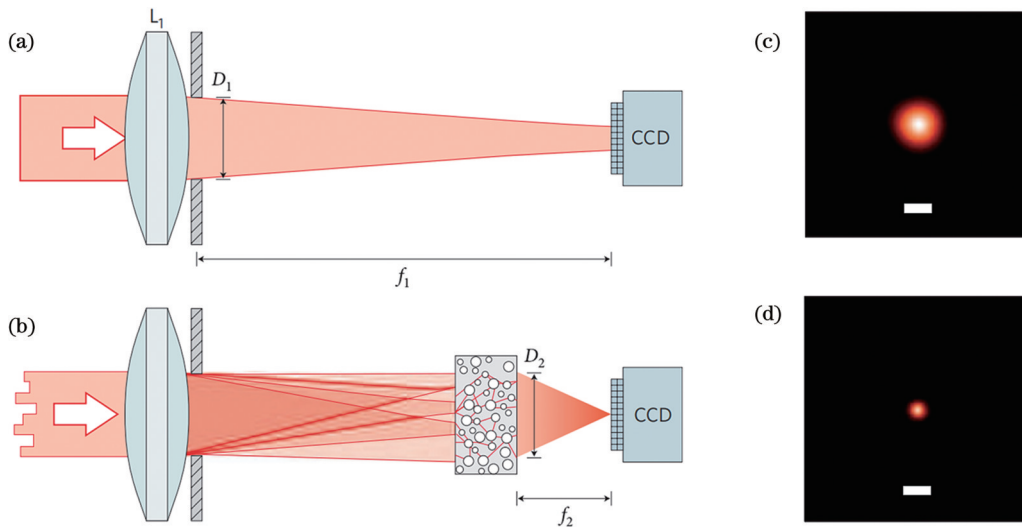


图 1 利用波前整形实现超衍射极限聚焦<sup>[12]</sup>。(a)传统透镜聚焦系统;(b)加入随机散射介质的聚焦系统;(c)传统透镜聚焦光斑;(d)利用波前整形实现超衍射聚焦光斑

Fig. 1 Focusing beyond diffraction-limit via wavefront shaping<sup>[12]</sup>. (a) Focusing system with conventional lens; (b) focusing system with random scattering media; (c) focal spot of conventional lens; (d) focal spot beyond diffraction-limit via wavefront shaping

#### 3.2 偏振调控

多重散射不仅会使激光的波前发生畸变,还会改变入射光的偏振态,使出射散斑的不同空间位置具有不同的偏振态。然而,多重散射过程将光的空间自由度和偏振自由度耦合,使得仅通过调制入射光的波前便可实现散射光的偏振调控。2012 年, Guan 等<sup>[58]</sup>通过在传统散射光聚焦的光路中加入四分之一波片和偏振

片,利用反馈型波前整形同时实现了散射光的聚焦和偏振调控。同年, Tripathi 等<sup>[17]</sup>首次测量了散射介质的矢量传输矩阵,相比于传统传输矩阵,矢量传输矩阵包含不同偏振分量之间的输入输出关系。利用矢量传输矩阵可以实现对聚焦焦点的偏振调控。2017 年, de Aguiar 等<sup>[16]</sup>发现直接对超短脉冲光进行宽带波前整形,可以使聚焦光斑恢复入射光的偏振且具有极高

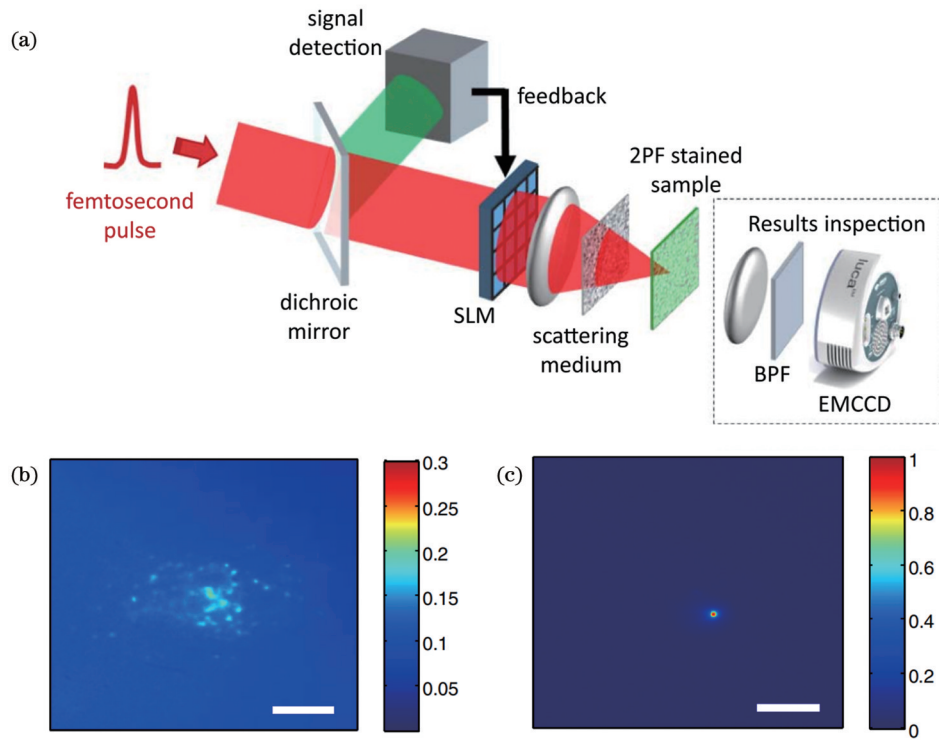


图 2 利用双光子荧光信号实现非侵入式聚焦<sup>[50]</sup>。(a)实验装置;(b)优化前 CCD 采集的散斑图;(c)优化后 CCD 采集的焦点图  
Fig. 2 Non-invasive focusing via two-photon fluorescence signal<sup>[50]</sup>. (a) Experimental setup; (b) speckle pattern acquired by CCD before optimization; (c) focal spot acquired by CCD after optimization

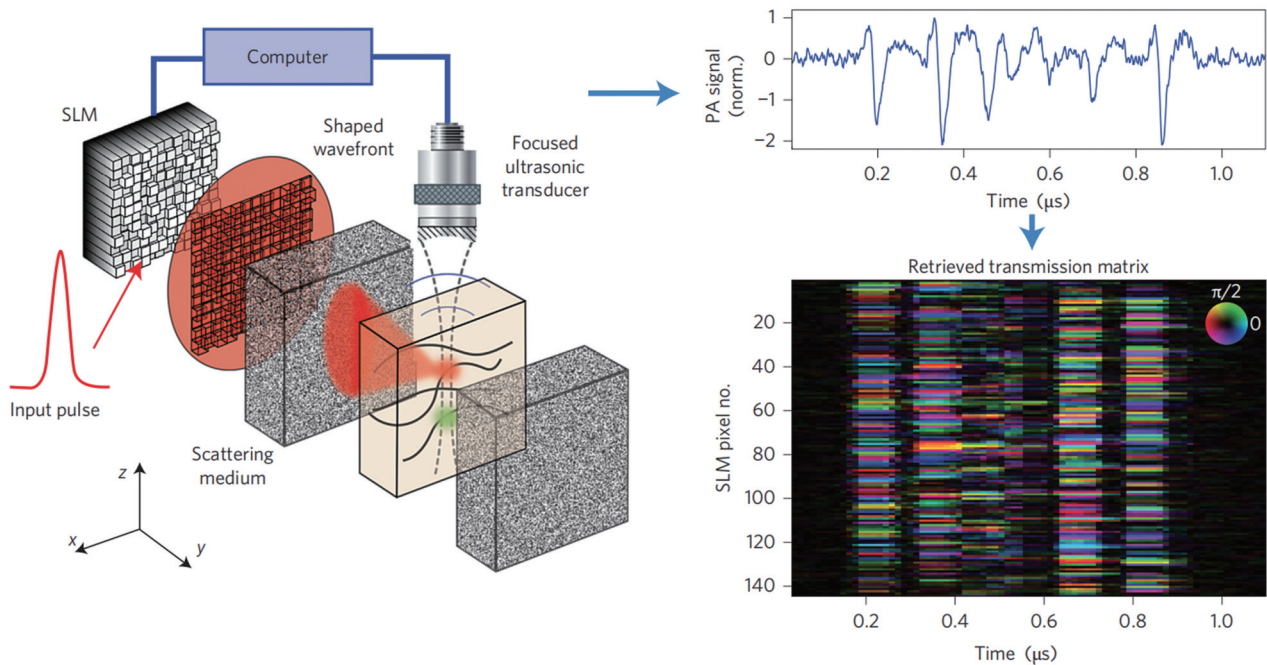


图 3 声光传输矩阵的测量装置和测量原理<sup>[54]</sup>  
Fig. 3 Measuring setup and principle of acousto-optic transmission matrix<sup>[54]</sup>

的偏振纯度,无需偏振片等额外的元件,实验效果如图 4 所示。产生这种现象的根本原因在于利用宽带波前整形方法进行短脉冲散射光的聚焦,其主要贡献源自飞行时间较短的光子,这部分光子仍保持初始偏振状态。2018 年, Xiong 等<sup>[59]</sup>成功测量了多模光纤的矢

量传输矩阵,对此传输矩阵与其复共轭的乘积进行本征值分解,求解对应的本征矢并加载到空间光调制器,便可实现多模光纤中的模式耦合和偏振控制。利用矢量传输矩阵实现偏振调控的实验装置如图 5(a)所示,实验效果如图 5(b)所示。

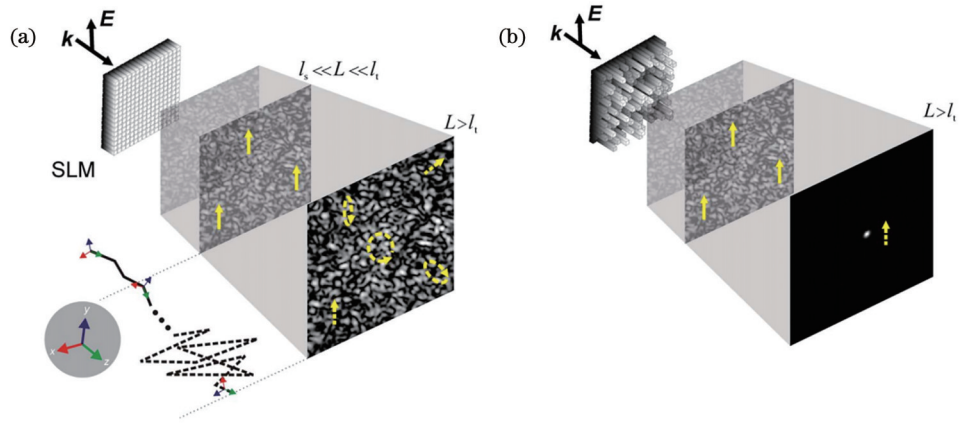


图 4 利用宽带波前整形实现偏振恢复<sup>[16]</sup>。(a)优化前出射场偏振分布;(b)优化后聚焦偏振分布

Fig. 4 Polarization recovery by broadband wavefront shaping<sup>[16]</sup>. (a) Polarization distribution of speckle before optimization; (b) polarization distribution of focal spot after optimization

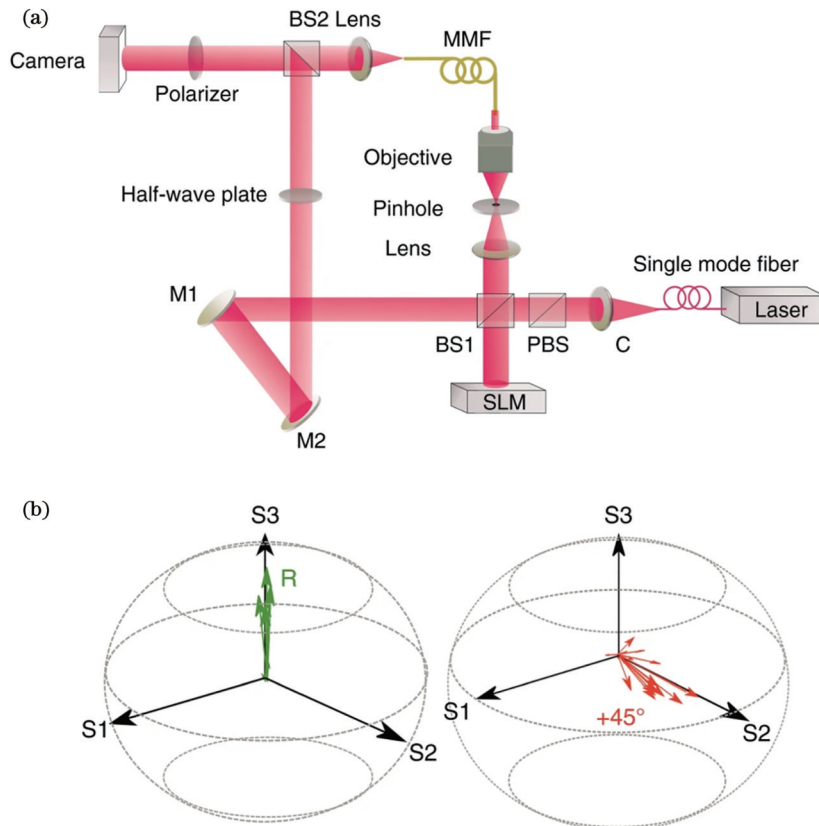


图 5 利用矢量传输矩阵实现偏振调控<sup>[59]</sup>。(a)实验装置图;(b)偏振调控效果

Fig. 5 Polarization manipulation via vector transmission matrix<sup>[59]</sup>. (a) Experimental setup; (b) results of polarization manipulation

### 3.3 频谱调控

通常,波前整形仅适用于很窄的频谱范围,在光波失谐频率超过介质的散斑关联频率后,散斑发生变化,原始产生的优化相位图将会失效。这并非一件坏事,散射中不同的散射光程将激光的时域和空域耦合<sup>[60]</sup>,使得通过调控波前来控制激光的时间维度成为可能。通过调整激光波前可以调控散射介质中不同频率分量的相对相位和振幅,从而允许输出光场在特定的时间和空间进行干涉并形成焦点。

通过调节波前来对波的时域特性进行调控最早在声学领域被提出。由于需要对超短脉冲进行脉冲响应干涉测量,因此这一方法不能被简单地照搬到光学领域。随着对超短脉冲表征手段的成熟,近年来对散射光场时间维度的调控也成为可能。2011年的3项研究拉开了利用波前整形方法调控激光脉冲时间维度的序幕:Aulbach等<sup>[61]</sup>将散射脉冲和参考脉冲之间的外差信号作为反馈信号,通过持续调制波前分布来优化确定时间和空间上单个测量点的振幅,实验装置和优化

效果如图 6 所示;Katz 等<sup>[62]</sup>在散射介质后放置一块双光子荧光材料,通过优化入射光波前来提高散射脉冲激光的荧光信号强度,间接地优化散射后脉冲的峰值

强度,成功将脉冲压缩至傅里叶极限宽度,实验装置和实验效果如图 7 所示;McCabe 等<sup>[63]</sup>搭建一套二维傅里叶变换光谱仪,可直接测量输出散斑的空间-频谱散斑

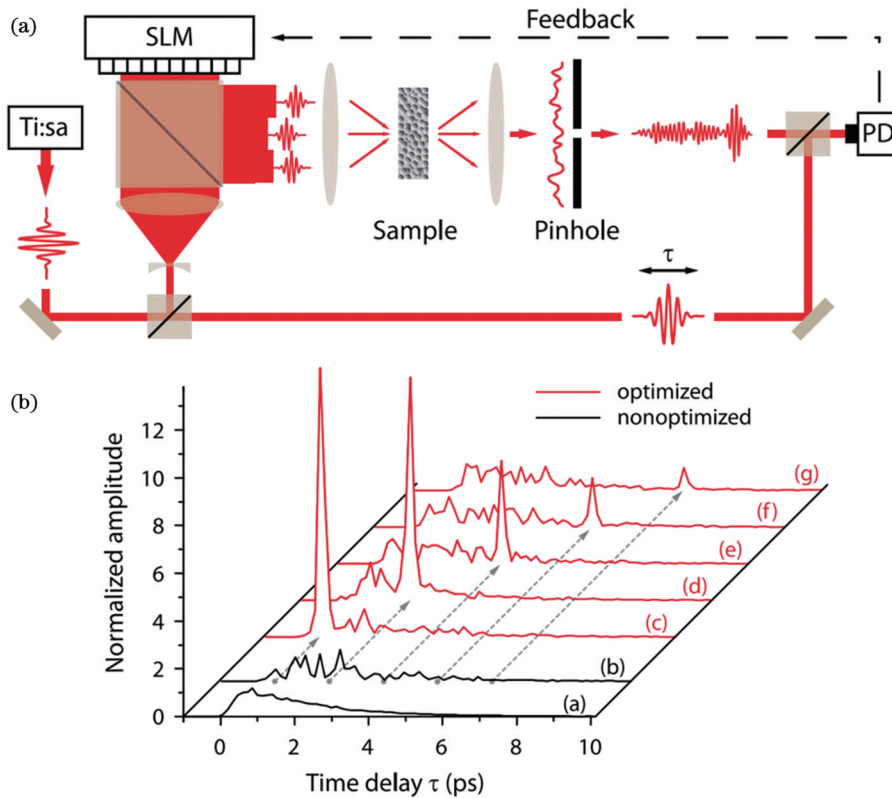


图 6 利用外差信号控制脉冲时域特性<sup>[61]</sup>。(a)实验装置图;(b)优化结果

Fig. 6 Control of pulse time-domain characteristics via heterodyne signals<sup>[61]</sup>. (a) Experimental setup; (b) optimized results

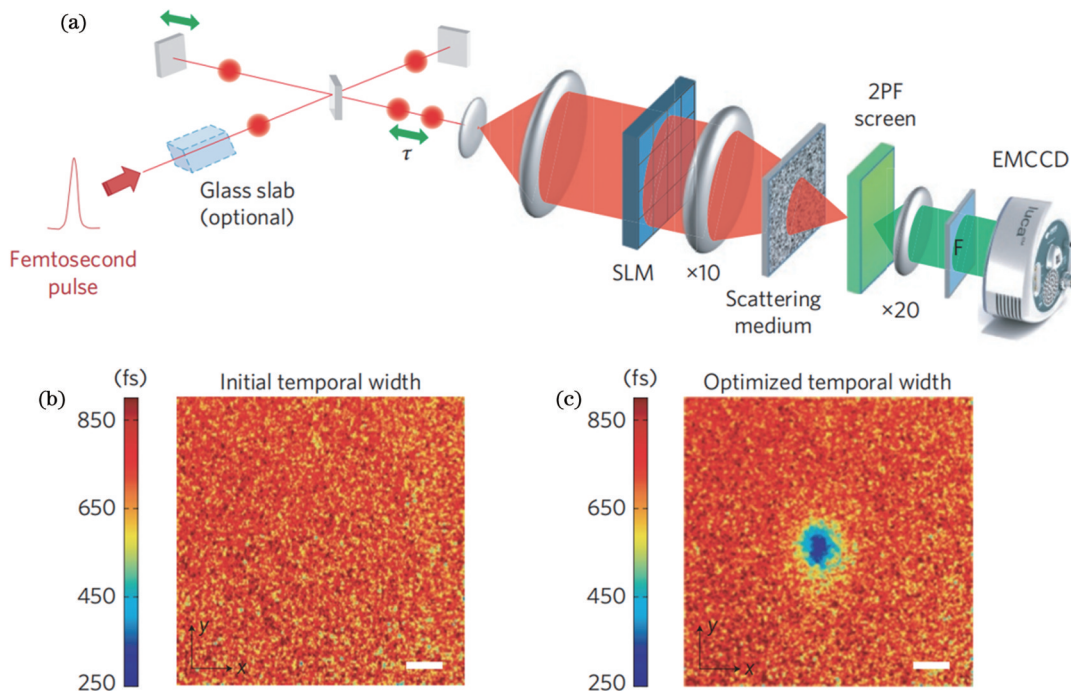


图 7 优化双光子荧光信号实现脉冲压缩<sup>[62]</sup>。(a)实验装置示意图;(b)优化前的脉冲宽度;(c)优化后的脉冲宽度

Fig. 7 Pulse compression by optimizing two-photon fluorescence signals<sup>[62]</sup>. (a) Experimental setup; (b) pulse width before optimization; (c) pulse width after optimization

场,通过对入射光波进行频谱整形,调节不同波长之间的相对相位关系,实现输出散斑场在时间和空间的同时聚焦。

尽管上述实验都可以利用波前整形方法实现对激光脉冲时域信号的调控,但是无法根据期望时域波形进行优化,而频域的传输矩阵方法可以满足这种需求。测量频域传输矩阵的方法可以归纳为:选取空间中一个特定的点,并测量期望频谱内不相关频率的相位和振幅,所有频率及脉冲响应构成的矩阵即为频域传输矩阵,输出场和输入场之间的关系可以描述为  $E_j^{\text{out}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{SLM}}} \sum_{k=1}^{N_w} t_{jik} E_i^{\text{in}}(\omega_k)$ , 其中  $E_j^{\text{out}}$  表示第  $j$  个输出

端的光场,  $E_i^{\text{in}}(\omega_k)$  表示在第  $i$  个输入端的频率为  $\omega_k$  的光场,  $t_{jik}$  表示频域传输矩阵的元素。基于此传输矩阵可以调制入射光波前来控制不同频率之间的相对相位,从而输出期望脉冲。2015年, Andreoli 等<sup>[64]</sup>首次测量了散射介质的宽光谱传输矩阵,但是所测量的传输矩阵未包含不同频率之间的相对相位关系,因此无法通过控制波前分布实现对脉冲时域特性的调控。2016年, Mounaix 等<sup>[65]</sup>在原有工作的基础上,通过额外引入一路已知相位的参考光,使得输出处的每个空间位置都可以获得输出脉冲的不同频率光之间的相对相位。进一步通过控制入射脉冲波前分布实现对输出脉冲的定制,如控制脉冲延迟、输出双脉冲等,如图 8 所示。

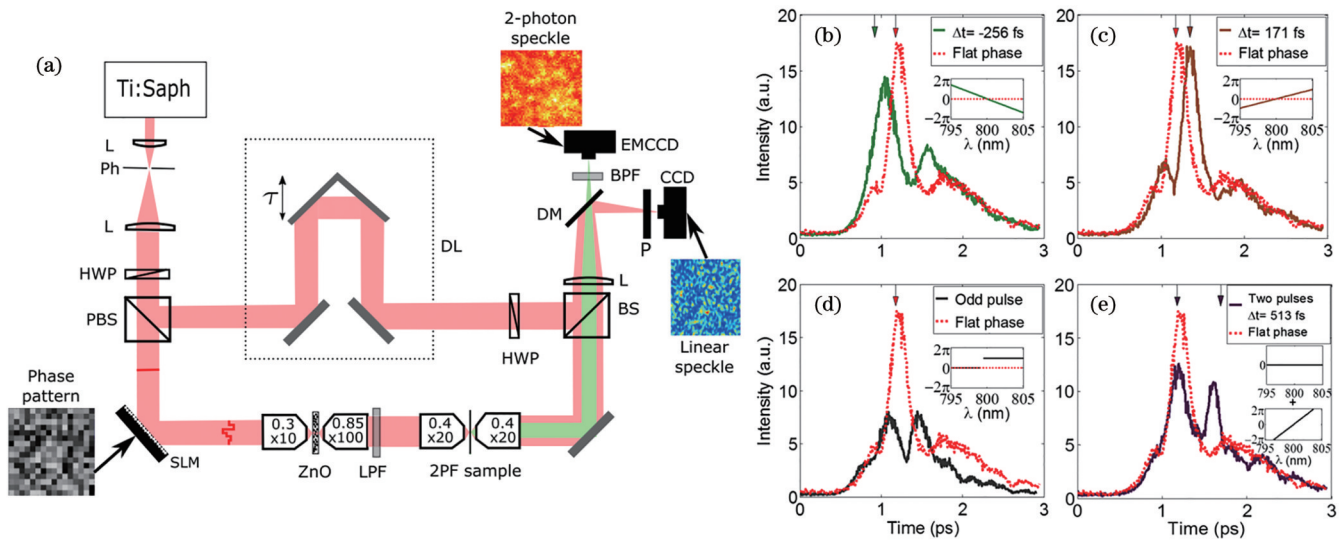


图 8 利用宽光谱传输矩阵实现脉冲时域调控<sup>[65]</sup>。(a)测量装置示意图;(b)~(e)利用宽光谱传输矩阵调控脉冲时域形状  
Fig. 8 Control of pulse time-domain characteristics via multispectral transmission matrix<sup>[65]</sup>. (a) Experimental setup; (b)~(e) pulse shape modulation by using multispectral transmission matrix

### 3.4 能量调控

对于无损耗的散射系统,实现 100% 能量传输在理论上是可行的,而在实际的散射系统中,只有比较少的一部分能量可以完全穿过散射介质或达到介质深处。散射光场调控为散射介质中的能量传输提供了方法,可以实现散射介质中能量的定向传输,这为操控混沌介质中的光与物质相互作用以及介质内部非侵入式成像开辟了新的途径。2012年, Kim 等<sup>[66]</sup>测量了散射介质的频域传输矩阵,并对矩阵进行奇异值分解,求取

散射介质的传输本征通道,实验结果表明,计算所得的本征通道可以极大提高光通过散射系统的能量。2018年, Jeong 等<sup>[67]</sup>利用超短脉冲激光测量散射介质的时间门反射矩阵,通过对矩阵进行奇异值分解求解其反射本征通道,成功增强了散射介质中目标物体的散射光强度。与未调制的情况相比,到达目标物体的光能量提高了 10 倍以上,效果如图 9 所示。Cao 等<sup>[68]</sup>基于反射矩阵光学相干层析成像系统,通过测量散射介质的反射矩阵,对其实施奇异值分解,实现了对单次散射光

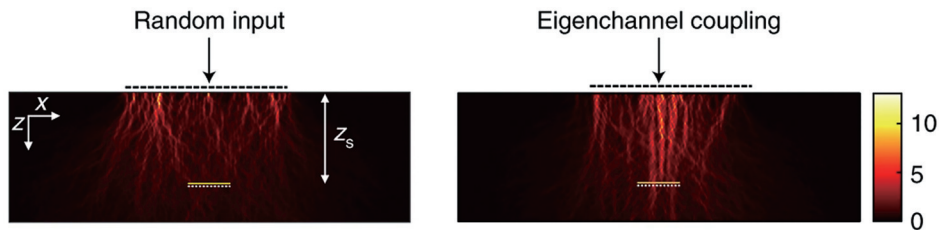


图 9 利用传输本征通道定向传输光能量效果示意图<sup>[67]</sup>  
Fig. 9 Schematic of directional transmission of optical energy via transmission eigenchannels<sup>[67]</sup>

子的分离,同时利用计算的相位图对入射光进行波前整形,使一部分散射光子耦合进入传输自由通道,这部分光子可以近乎无损耗地到达目标区域。

### 3.5 轨道角动量调控

上述提及的空间、偏振、频谱和能量均为光学的常见自由度,而在某些情况下,人们更关心光的轨道角动量(OAM)自由度。近年来,携带轨道角动量的光束已经成为光学操纵<sup>[69]</sup>、超分辨成像<sup>[70]</sup>和高容量光通信<sup>[71]</sup>等领域的通用工具。散射光场调控已被证明可用于实现散射光的轨道角动量调控。2017年,Boniface等<sup>[14]</sup>利用基于传输矩阵方法的点扩散函数工程生成透过散

射介质的轨道角动量光束,实现原理如图 10 所示。通过对散射介质的传输矩阵进行傅里叶变换,在其频域乘以轨道角动量的相位分布后进行傅里叶逆变换,结合光学相位共轭法即可实现散射介质后的轨道角动量光束生成。2020年,Zhang等<sup>[28]</sup>首次提出了基于轨道角动量基的传输矩阵,可以通过在求解聚焦相位图的过程中偏移一个拓扑荷的形式轻松产生轨道角动量光束。2021年,Li等<sup>[72]</sup>通过在散射介质后方加入一块螺旋相位板,利用反馈型波前整形方法实现了对原始携带轨道角动量的入射光的复原,并在实验中演示了对拓扑荷数为 4、5、6 和 7 的轨道角动量光束的复原。

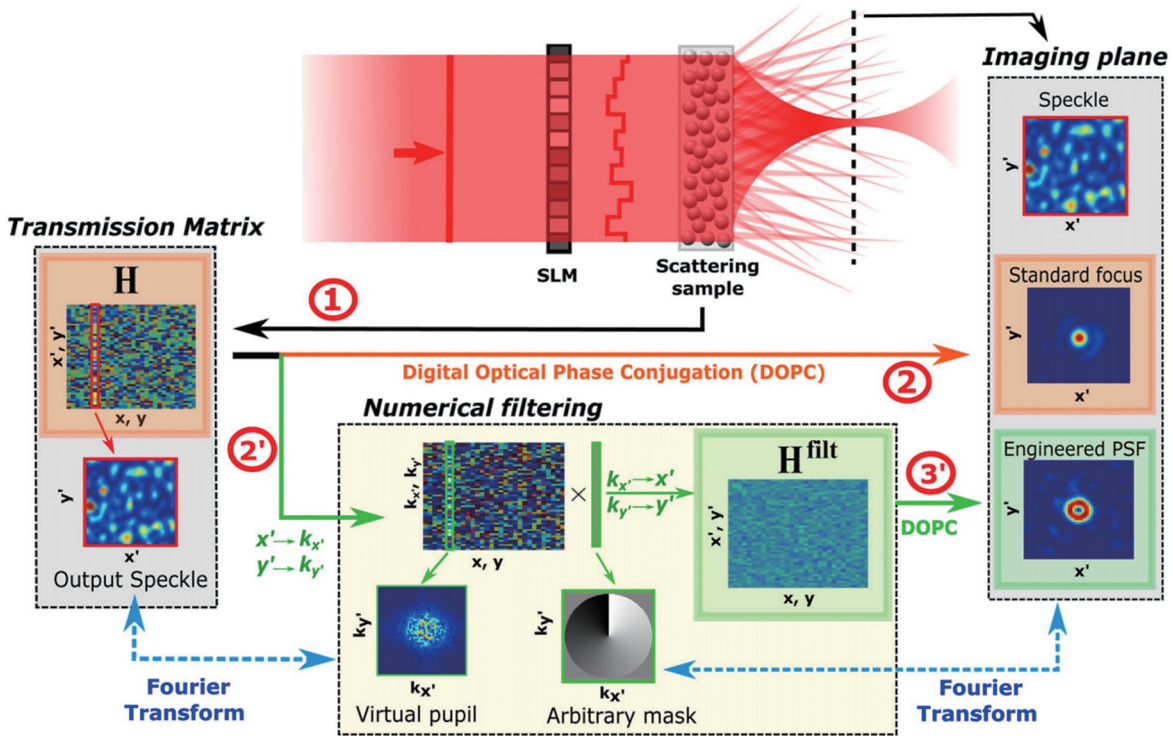


图 10 基于传输矩阵的点扩散函数工程的原理<sup>[14]</sup>

Fig. 10 Principle of point-spread-function engineering based on transmission matrix<sup>[14]</sup>

## 4 散射光场调控应用

### 4.1 成像

自 2007 年以来,散射光场调控得到了飞速发展,尤其是在聚焦效率和聚焦速度上<sup>[73-75]</sup>。散射介质对散射光高效聚焦的特性使其可作为一个成像透镜,因此散射光场调控技术被广泛应用于成像领域。基于散射光场调控实现光学成像主要包括以下 3 种方案:1)利用传输矩阵直接对探测的出射散斑进行计算成像;2)在介质内部聚焦后利用散射介质的记忆效应进行扫描成像;3)通过传输矩阵在视场范围内进行光栅扫描。

2010 年,Popoff等<sup>[9]</sup>利用单臂干涉的实验装置[图 11(a)],基于四相移干涉法首次实现对散射介质的空域传输矩阵的测量,其中传输矩阵的大小为

256×256。通过将矩阵的共轭转置与输出的散斑场相乘,即可复原原始入射光场信息,图像的还原度高达 94.5%,如图 11(b)、(c)所示。Choi等<sup>[76]</sup>基于角谱成像原理构建了频域传输矩阵,其使用独立的参考臂进行干涉测量,获得比单臂干涉测量方法更准确的结果。2020年,Boniface等<sup>[48]</sup>利用相位恢复算法首次提出基于荧光信号的传输矩阵,并实现了对离散物体的图像复原,测量装置如图 12 所示。

当光经过散射介质后,在一定入射角度范围内输出散斑的形状与分布不会发生明显改变,只会随着入射角度发生整体偏移,这种效应称为散射介质的光学记忆效应<sup>[77]</sup>。Katz等<sup>[50]</sup>通过优化算法最大化介质的双光子荧光信号,使入射光聚焦在散射介质背后的样品表面,然后利用光学记忆效应进行焦点扫描来对生物组织进行扫描成像,成像效果如图 13 所示。在散射



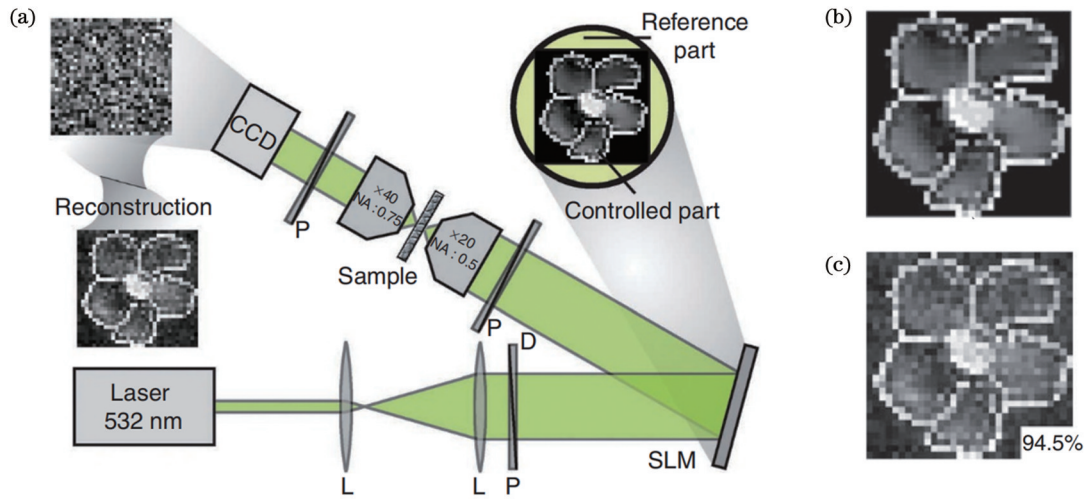


图 11 利用传输矩阵法直接对探测的出射散斑进行计算成像<sup>[9]</sup>。(a)传输矩阵测量实验装置;(b)待复原图像;(c)复原图像  
Fig. 11 Direct computational imaging of detected output speckle via transmission matrix method<sup>[9]</sup>. (a) Experimental setup for transmission matrix measurement; (b) original image; (c) restored image

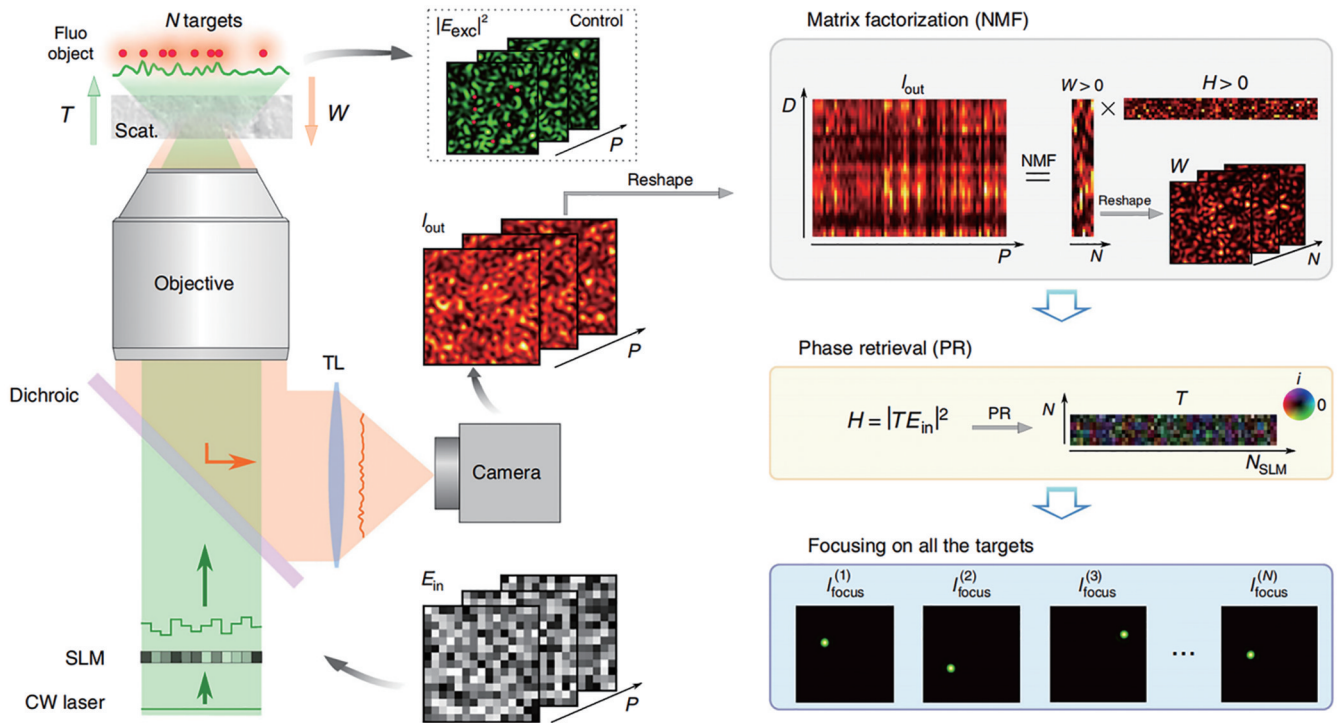


图 12 基于荧光信号的传输矩阵测量装置及测量原理<sup>[48]</sup>  
Fig. 12 Measurement setup and principle of fluorescence-based transmission matrix<sup>[48]</sup>

光场调控中,用于提供反馈信号的导星是必不可少的。但是,对于非视距成像这一应用场景,由于待成像物体的位置未知,因此无法人为地为待成像物体设置导星。Cao 等<sup>[78]</sup>创新性地将物体自身作为导星,通过优化算法将小孔径光束聚焦在视距范围外的物体上,再通过增大孔径来缩小焦点,并利用障碍物的光学记忆效应进行扫描成像,成像的原理图见图 14。尽管光学记忆效应可以很方便地实现对焦点的扫描,但是记忆效应的范围与介质的传输平均自由程成反比,这意味着其视场范围在厚的散射介质中十分有限。

除了上述两种成像方法外,常用的成像方法还有通过传输矩阵进行散射场聚焦并在视场范围内进行光栅扫描成像。内窥镜被广泛应用于生物组织结构的医疗诊断和治疗,基于单根多模光纤的内窥镜可以减小传统光纤束内窥镜对于生物组织的破坏<sup>[79-80]</sup>。2018年, Turtaev 等<sup>[79]</sup>首次利用单根多模光纤实现了对大脑组织的内窥成像,成像方案如图 15(a)所示。通过预先对多模光纤的传输矩阵进行校准,可以在光纤远端的任意位置进行光聚焦和光栅扫描,每个光焦点所激发的荧光信号可以被同一光纤采集并进行处

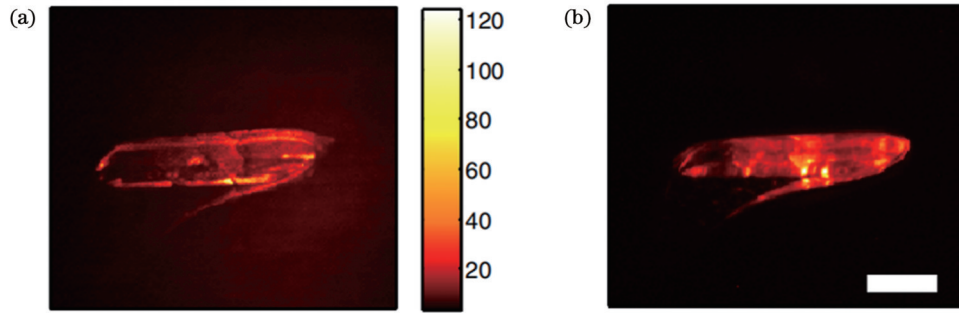


图 13 利用双光子荧光信号实现非侵入式成像<sup>[50]</sup>。(a)利用记忆效应实现的组织扫描成像图;(b)在无散射介质状态下组织显微成像图

Fig. 13 Non-invasive imaging via two-photon fluorescence signals<sup>[50]</sup>. (a) Microscope image of the tissue using memory effect; (b) transmission microscope image of the same object without scattering medium

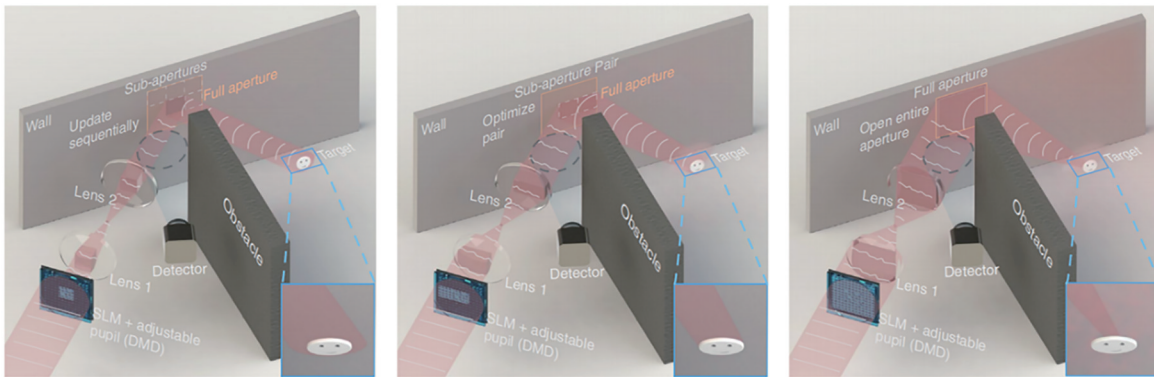


图 14 利用待成像物体作为导星的非视域成像原理图<sup>[78]</sup>

Fig. 14 Principle of non-line-of-sight imaging using the object as a guidestar<sup>[78]</sup>

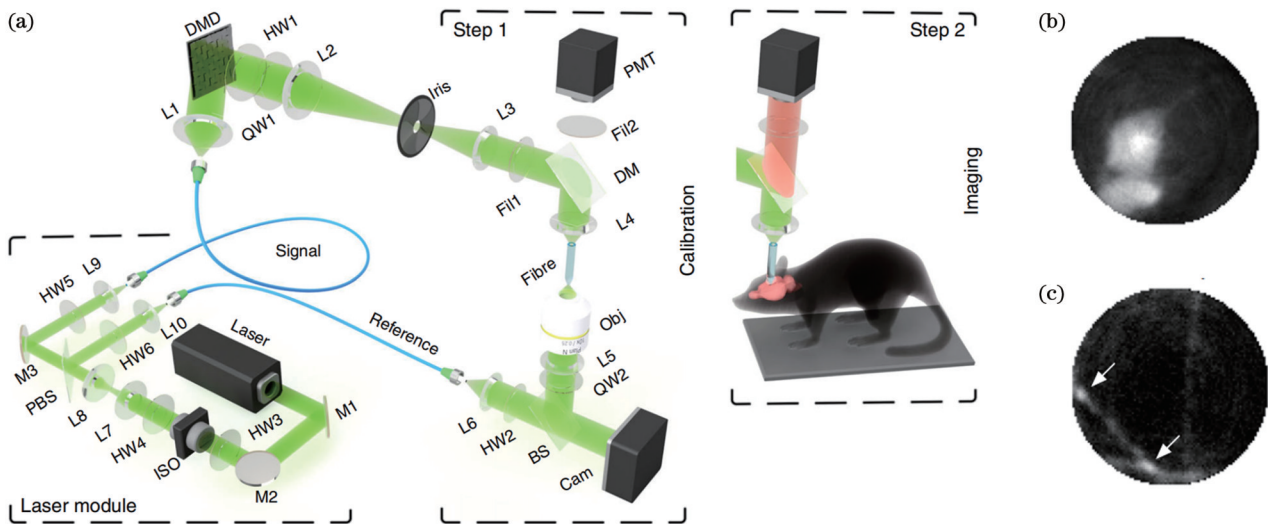


图 15 基于单根多模光纤的内窥成像系统<sup>[79]</sup>。(a)实验装置;(b)(c)对小鼠不同神经组织的成像

Fig. 15 Endoscopic imaging system based on a single multimode optical fiber<sup>[79]</sup>. (a) Experimental setup; (b)(c) imagings of different neural tissues in mice

理成像。对不同生物组织的成像如图 15(b)、(c)所示。

散射光场调控除了用于二维成像外,在三维全息成像方面也具有较大的应用价值。三维全息显示是一种全新的显示技术<sup>[81]</sup>,可以将光场投影到真实的三维

空间中,是未来应用于增强现实和虚拟现实场景的潜在技术。为了在较大的轴向范围进行三维全息成像,现有的方法基于空间光调制器等波前调制设备,利用菲涅耳全息法构建三维全息图<sup>[82-83]</sup>。然而,这种方法所产生的全息图的相干串扰和成像深度受到空间光调

制器的衍射角和像素数的限制。通过在系统中引入散射介质,可以极大地提升系统的空间-带宽积,提高系统的显示精度和成像深度。Yu等<sup>[84]</sup>通过在全息成像装置中插入两块散射片,并结合波前整形方法,实现了空间三维聚焦,其视角和图像尺寸的乘积相比传统方法提高了3个数量级以上,如图16所示。Yu等<sup>[85]</sup>提出一套三维散射辅助动态全息的方案,仅使用 $96 \times 96$ 个像素便实现了约3 mm的轴向分辨率,该分辨率相比目前最先进的方法提高了一个数量级,实验

效果对比如图17所示。Yang等<sup>[86]</sup>提出一种具有全频信息记录能力的超高清全息三维显示方法,该方法逆向利用散射介质扰乱入射光子传播轨迹的机制,重新分配并充分混合光场的高频和低频分量,将包含全部频率成分的光场信息通过光致聚合物记录,能够在全息显示时精确地恢复在以往全息技术中丢失的高频信息,巧妙地解决了现有全息显示技术高频分量丢失和全息图记录精度低所导致的图像清晰度不足的问题。

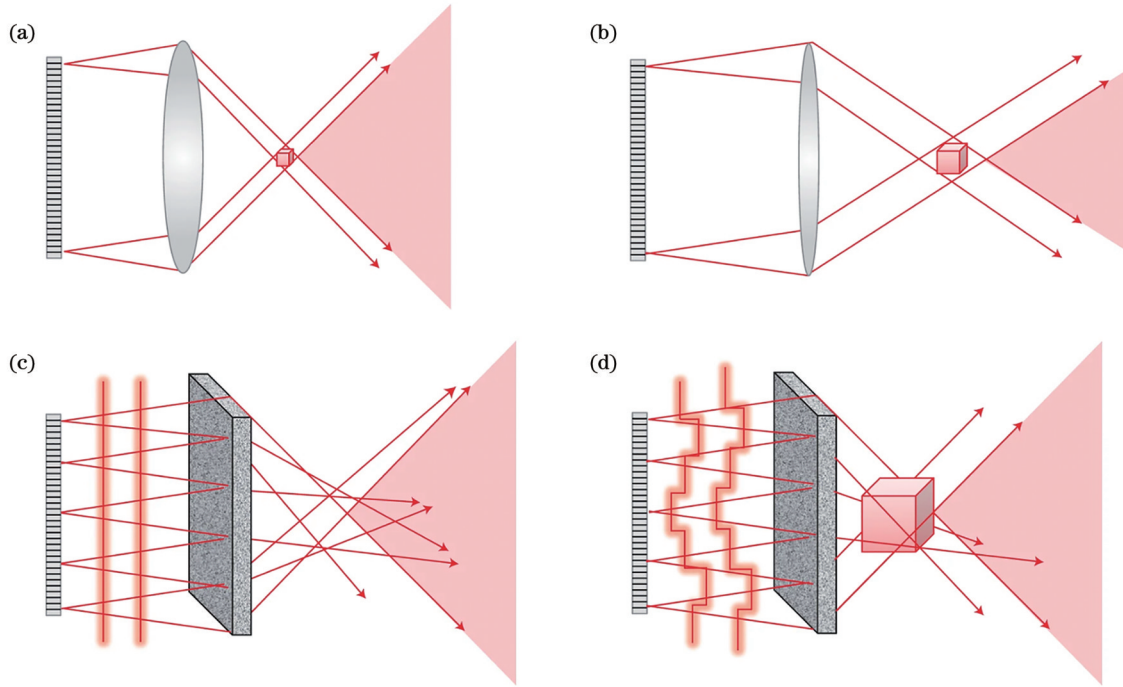


图 16 利用散射实现全息示意图<sup>[84]</sup>。(a)(b)利用普通透镜实现傅里叶全息;(c)(d)利用波前整形方法结合散射效应实现全息  
Fig. 16 Schematic of holography using scattering<sup>[84]</sup>. (a) (b) Fourier holography using conventional lens; (c) (d) holography using wavefront shaping combined with scattering effect

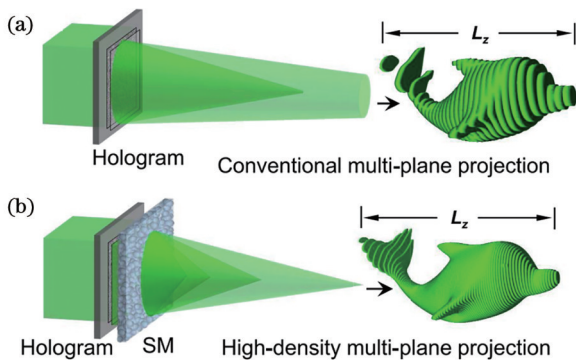


图 17 传统多平面投影效果与三维散射辅助动态全息效果的对比<sup>[85]</sup>。(a)传统多平面投影效果;(b)三维散射辅助动态全息效果

Fig. 17 Comparison of conventional multi-plane projection and three-dimensional scattering-assisted dynamic holography<sup>[85]</sup>. (a) Conventional multi-plane projection; (b) three-dimensional scattering-assisted dynamic holography

## 4.2 通信

光波是通信中信息传输的重要载体之一,提升光的信息容量是当前研究的热点问题,传统方法是通过复用光的波长、偏振等维度来增加通信信道。光的OAM具有无限大的正交模式数,理论上可以为数据传输提供无限多的信道,因此被认为是在通信中很有潜力的自由度,目前已经被广泛应用于自由空间<sup>[87-89]</sup>和光纤<sup>[90-91]</sup>等场景的高容量通信。然而,使用OAM多路复用的光束在自由空间中传播时难免会受到散射的影响,这将会扰乱复用光束的波前,破坏不同OAM信道之间的正交性,增加串扰。2019年,Gong等<sup>[92]</sup>利用传输矩阵方法,成功地从强散射场中实现了24个通道复用OAM光束的解复用,相邻OAM通道之间的串扰低至 $-13.8$  dB,并在其构建的数据传输系统中实现了图像的高保真传输,误码率小于0.08%,实验光路如图18(a)所示,复用效果如图18(b)、(c)所示。Liu等<sup>[93]</sup>提供了一种结合轨道角动量无穷维度特性以及非

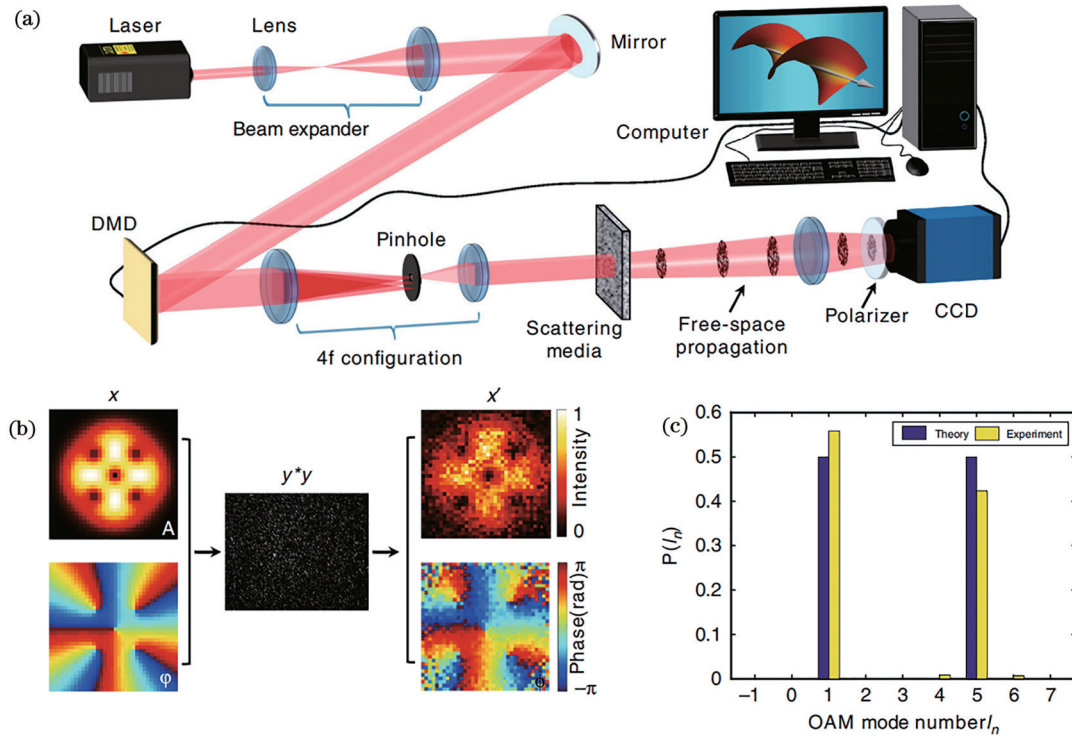


图 18 基于传输矩阵方法的 OAM 通信方案<sup>[92]</sup>。(a)实验装置;(b) OAM 光束复振幅恢复效果演示;(c)实验测量 OAM 谱与理论 OAM 谱对比

Fig. 18 OAM communication scheme based on transmission matrix method<sup>[92]</sup>. (a) Experimental setup; (b) demonstration of OAM beam complex amplitude recovery; (c) comparison of experimentally measured OAM spectrum with theoretical OAM spectrum

视域通信的方案,该方案在光接收装置(单像素探测器)处采用神经网络算法解码非视域条件下光信号中的信息,可以实现低于 1% 的误码率。

由于复杂的散射系统可以用传输矩阵来表示,即用传输矩阵可以连接散射介质两端的输入场和输出场,因此可以通过定制输入光的波前分布来获得期望的输出场,也就是说,可以通过对散射光场的调控将散射介质转换为具有特定功能的光学元件。基于这个原理, Mao 等<sup>[15]</sup>利用散射光场调控实现对光的自旋和轨道角动量转换的主动控制。考虑到耦合转换控制可以应用于相同或不同的自由度之间,研究人员通过散射系统在实验中实现了 4 类角动量转换,包括轨道-轨道、自旋-轨道、轨道-轨道、自旋-自旋角动量之间的转换,为光的角动量调控提供了一种全新的方案,实验光路如图 19 所示。

在室内场景进行光无线通信时,往往利用墙壁等障碍物对光的漫反射来进行发射机与接收机之间的连接。然而,障碍物的存在会显著降低光信号的强度,传统方法采用的措施是提高发射光的功率,这对于人眼是极其不友好的。Cao 等<sup>[18]</sup>利用波前整形方法,显著提高了到达光接收机的光强度,该通信系统可以在 20° 的范围内实现对漫反射信号的增强,并以大于 17 dB 的增益实现高达 30 Gbit/s 的正交频分复用信号传输。

### 4.3 非线性光学

非线性光学是现代光学研究的一个重要分支,具有十分重要的应用价值:1)利用非线性晶体的二阶或三阶非线性,实现激光频率转换,获得各种波段的激光<sup>[94]</sup>;2)利用晶体的电光效应,实现高速电光调制器<sup>[95-98]</sup>;3)非线性成像可以实现超分辨率成像<sup>[99-101]</sup>,被广泛应用于各种生物成像。前期的研究认为,传输矩阵描述线性状态下系统的输入-输出关系,当系统包含非线性效应时,传输矩阵的适用性将显著降低,因此在前期的各种实验中,反馈型波前整形方法最先被用到非线性散射系统中。2017年, Qiao 等<sup>[102]</sup>利用波前整形方法实现了对非线性散射信号的操纵,为表征非线性散射介质的散射特性提供了新的思路。利用反馈波前整形方法通过优化基频光的波前分布,实现了对非线性散射介质产生的倍频散射信号的聚焦,实验装置如图 20(a)所示,优化前后的效果如图 20(b)、(c)所示。此外,通过对反馈信号的目标位置和形状进行定制,还可以实现更复杂的聚焦行为,如双点聚焦和多点聚焦。Qiao 等<sup>[21]</sup>还证明了波前整形方法除了可用于操纵非线性散射信号的空间特性,还可用于操控非线性信号的光谱。实验中,经过空间光调制器进行波前整形的超短脉冲入射到非线性散射质中,通过选择特定的倍频波长进行优化,随着迭代次数的增加,所选波长脉冲持续增强。Tzang 等<sup>[19]</sup>通过优化入射到多模光

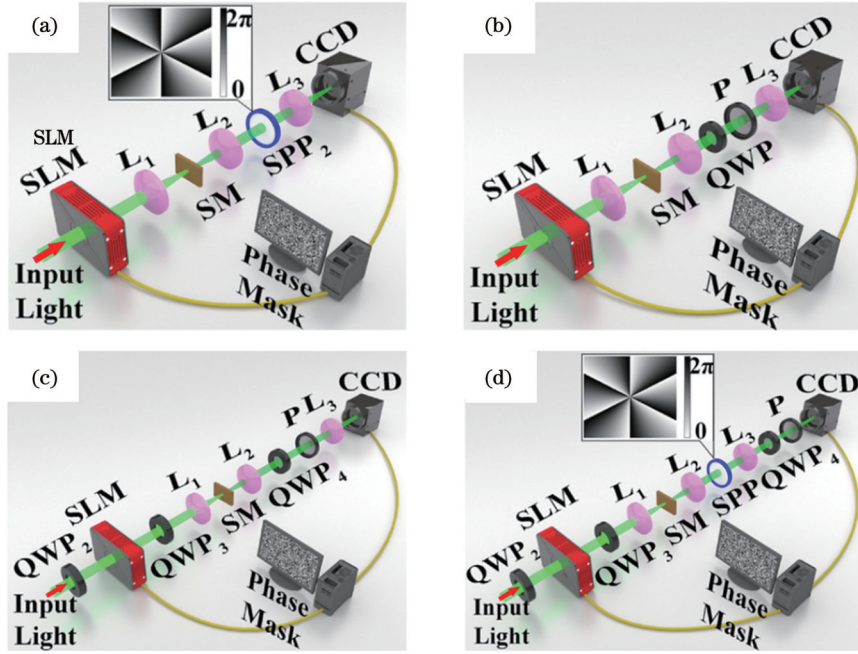


图 19 不同角动量之间的转换实验装置<sup>[15]</sup>。(a)轨道-轨道;(b)轨道-自旋;(c)自旋-自旋;(d)自旋-轨道

Fig. 19 Experimental setup for conversion between different angular momenta<sup>[15]</sup>. (a) OAM-OAM; (b) OAM-SAM; (c) SAM-SAM; (d) SAM-OAM

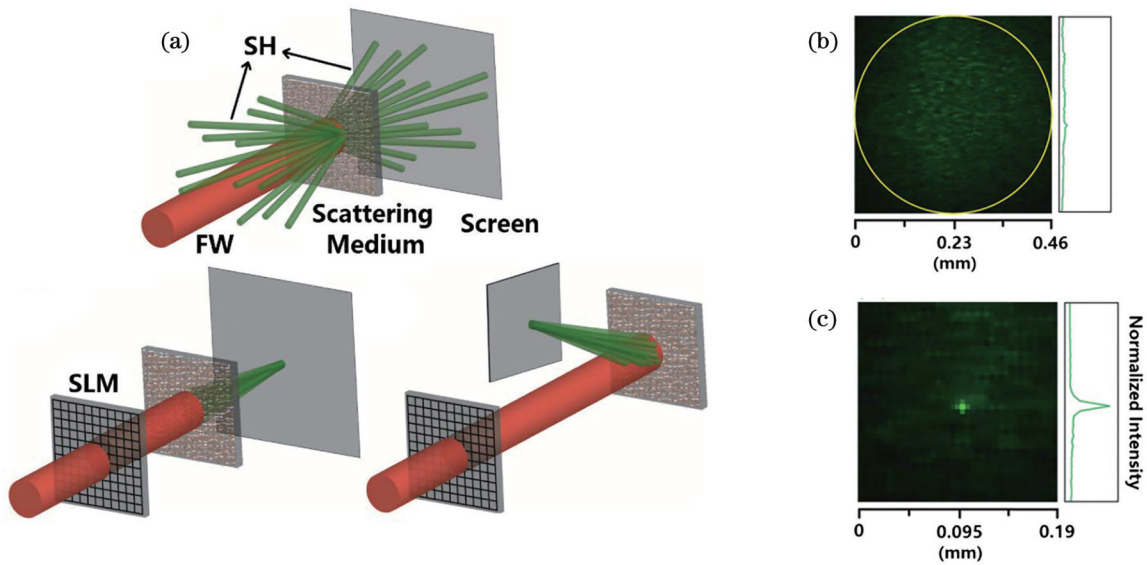


图 20 通过反馈波前整形方法实现倍频散射信号聚焦<sup>[102]</sup>。(a)原理示意图;(b)倍频信号优化前的散斑图;(c)倍频信号优化后的聚焦图

Fig. 20 Second harmonic focusing via feedback-based wavefront shaping method<sup>[102]</sup>. (a) Schematic of principle; (b) speckle pattern of second harmonic light before optimization; (c) spot focusing pattern of second harmonic light after optimization

纤的 532 nm 激光的波前,成功实现对多模光纤中非线性过程的灵活操纵,例如,增强、移动或抑制反斯托克斯信号,移动基模频谱等。实验装置如图 21 所示。

2023 年, Moon 等<sup>[103]</sup>将传输矩阵的概念引入非线性领域,成功测量了非线性散射介质的散射张量,证明了具有二阶非线性效应的散射介质的输入-输出响应

可以由一个三阶散射张量完全表征。相较于线性传输矩阵,非线性散射张量的秩提升了约  $(N + 1)/2$  倍 ( $N$  为入射模式数),这在信息加密领域具有重要的应用价值。与此同时, Ni 等<sup>[104]</sup>将传输矩阵方法应用于非线性谐波操纵,通过固定一路信号光的波前,同时控制另外一路信号光的波前,利用四步相移干涉法建立了和频散射信号与两路入射光之间的散射矩阵,实验装置如

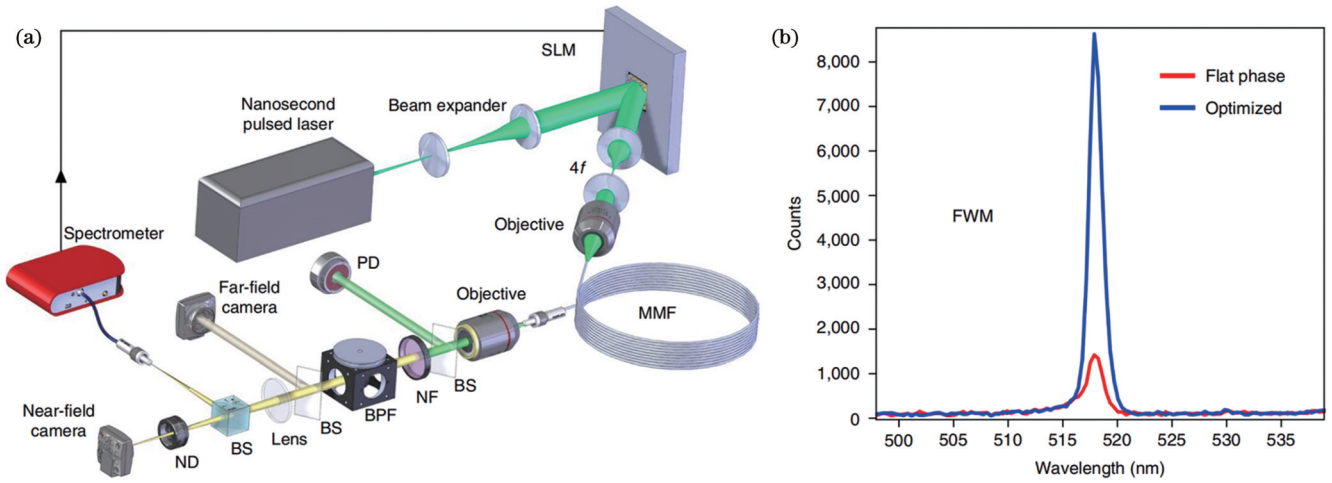


图 21 通过反馈波前整形方法实现多模光纤中非线性过程的操纵<sup>[19]</sup>。(a) 实验装置；(b) 优化与未优化的四波混频信号强度对比  
 Fig. 21 Manipulation of nonlinear processes in multimode fibers via feedback-based wavefront shaping method<sup>[19]</sup>. (a) Experimental setup; (b) comparison of optimized and unoptimized intensity of four-wave mixing signal

图 22(a) 所示。通过结合数字光学共轭法可以实现对和频输出场的任意操纵, 比如单点聚焦、多点聚焦、光栅扫描等, 如图 22(b) 所示。这项工作为非线性信号恢复、复杂环境的量子信息处理提供了潜在的解决方案。

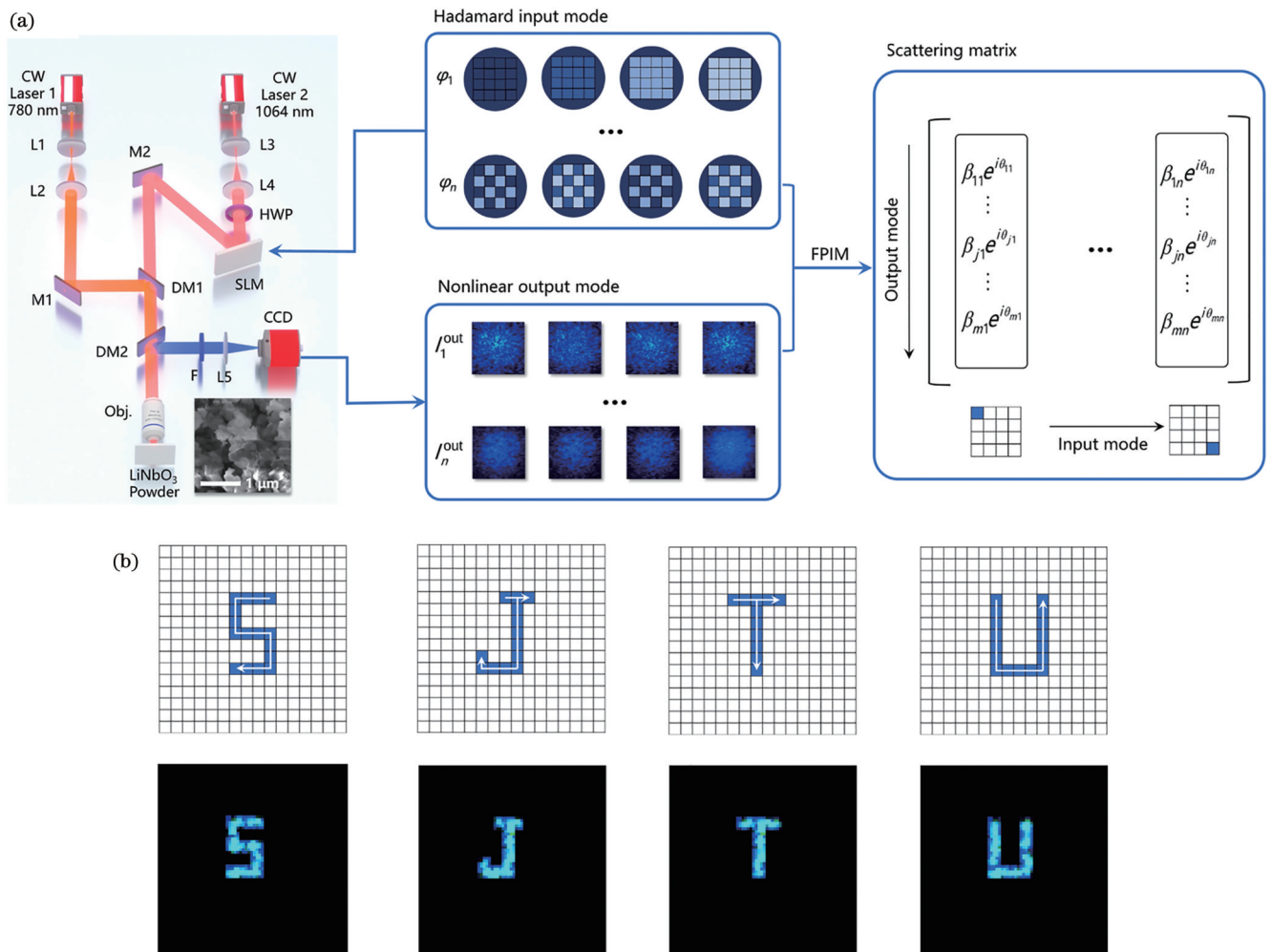


图 22 基于散射矩阵方法的非线性散射信号操纵<sup>[104]</sup>。(a) 散射矩阵测量装置及原理；(b) 动态扫描和频信号结果  
 Fig. 22 Nonlinear scattering signal manipulation via scattering matrix method<sup>[104]</sup>. (a) Scattering matrix measurement setup and principle; (b) dynamic scanning results of sum-frequency signals

### 4.4 量子光学

量子信息在复杂环境中的传输和量子态控制是量子信息技术的核心挑战<sup>[105-111]</sup>, 散射光场调控为复杂介质中的量子操控提供了一种全新的方法, 并且将随机介质转换为光量子的可重构光学平台。Valencia 等<sup>[109]</sup>利用光量子的纠缠特性实现了复杂介质的传输矩阵测量, 其通过操纵未经过复杂介质的光子而非经过复杂介质的光子, 成功恢复了丢失的量子相关性。此外, 量子随机行走具有模拟复杂物理系统的潜力, 而增加量子网络的复杂性对于提升量子随机行走的应用范围是至关重要的, 随机介质为提升系统复杂度提供了一个极具潜力的平台。Defienne 等<sup>[106]</sup>在支持 380 个模式的多模光纤中利用传输矩阵方法控制双光子态在多模光纤中的传播, 实现了不可分辨光子对的量子行走, 实验装置及结果分别如图 23(a)、(b)所示。

Peng 等<sup>[107]</sup>将散射光场调控应用于控制自发参量下转换过程, 实现了在复杂介质中对下转换光子对在空域以及频域上的控制, 补偿了晶体缺陷中的散射影响。Valencia 等<sup>[109]</sup>将泵浦光作为反馈信号优化泵浦光的波前, 实现了对自发参量下转换产生的纠缠光子对的散射补偿。尽管纠缠光子对的波长与泵浦光的波长不同, 但是它们具有相似的散斑图案, 这使得优化泵浦波前来补偿纠缠光子对的散射成为可能, 实验光路和实验效果分别如图 24(a)、(b)所示。Huang 等<sup>[111]</sup>构建了一套单光子整形装置, 在多用户量子网络中实现了基于遗传优化算法的频率无关单光子波前整形, 使得经过散射的不同波长通道的纠缠分发效应显著增强。这一方法有效地改善了多模光纤的纠缠分发过程, 同时网络的量子特性在经过时空整形后可以被很好地保持。

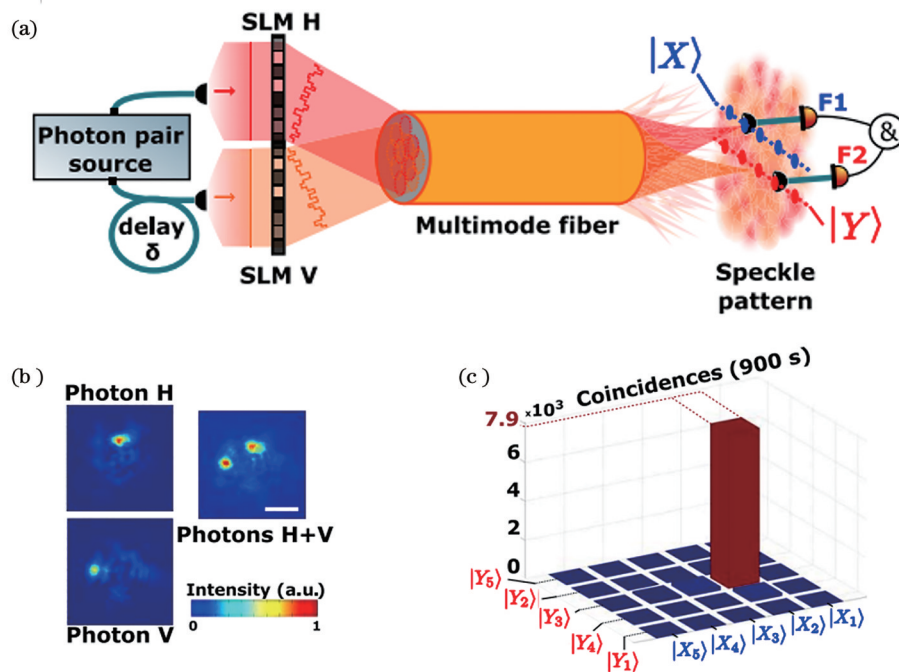


图 23 在目标双光子输出态聚焦光子对<sup>[106]</sup>。(a)实验装置;(b)不同光子态聚焦于不同空间位置;(c)双光子态符合计数率  
Fig. 23 Focusing photon pairs in the target two-photon output state<sup>[106]</sup>. (a) Experimental setup; (b) different photonic states focused at different spatial locations; (c) two-photon state coincidence counting rate

### 4.5 光学检测

多重散射效应会使光的多个自由度互相耦合, 利用这个特殊的散射特性, 除了可以实现散射光场的多自由度调控, 还可以在光学检测中实现对入射光自由度的测量, 例如波长、偏振和轨道角动量等。2012年, Redding 等<sup>[112]</sup>利用基于多模光纤的传输矩阵方法实现了高分辨率的光谱测量, 实验中使用 5 m 的多模光纤在 5 nm 带宽上获得了 0.03 nm 的分辨率, 重建光谱的信噪比高于 1000。2023 年, Sun 等<sup>[113]</sup>提出一种基于非线性频率转换的近红外散斑波长计, 该方案利用非线性频率转换将红外波段的待测光转换

到探测成本更低的可见光波段, 并利用深度学习网络实现了可见光散斑与入射近红外光波长之间的映射, 波长分辨率高达 1 pm, 实验装置如图 25(a)所示, 实验效果如图 25(b)所示。Facchin 等<sup>[114]</sup>利用散射介质的传输矩阵方法实现了入射光的偏振态测量, 利用 17 个测试散斑的图像即可实现入射光的 3 个斯托克斯参数测量, 测量误差低至 0.05。此外, Fickler 等<sup>[115]</sup>利用波前整形方法实现了对携带不同角量子数和径向量子数的 OAM 光束进行分类, 最高可实现 7 个模式的同时分类, 分类概率可达到 80% 以上。

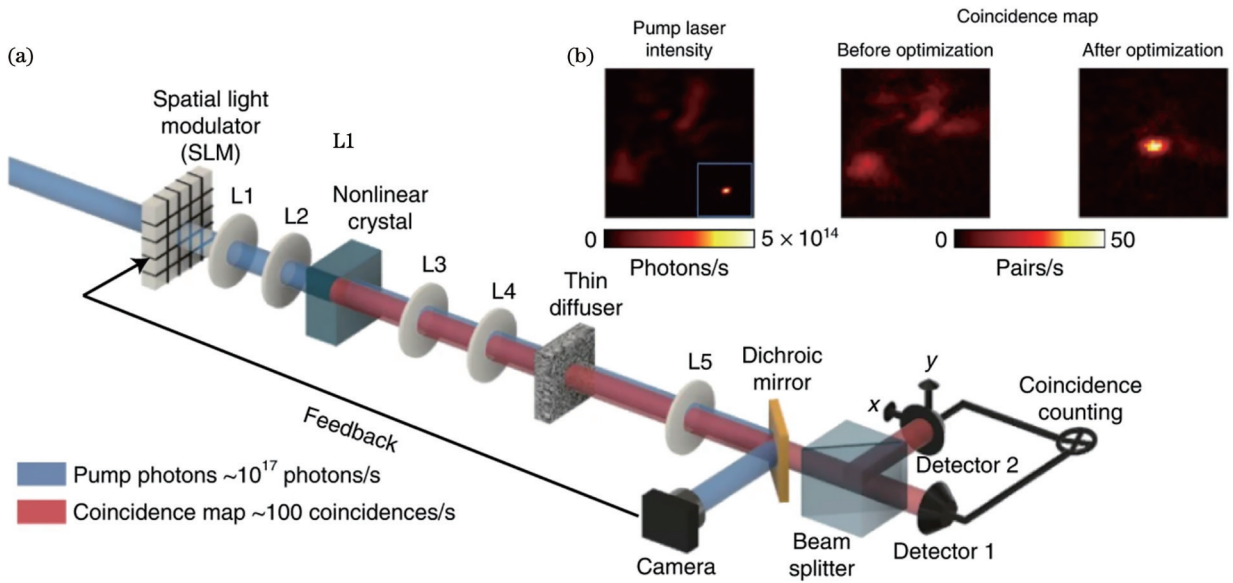


图 24 通过优化泵浦波前实现纠缠光子对的散射补偿<sup>[110]</sup>。(a)实验装置图；(b)实验结果

Fig. 24 Scattering compensation of entangled photon pairs by optimizing the pump wavefront<sup>[110]</sup>. (a) Experimental setup; (b) experimental results

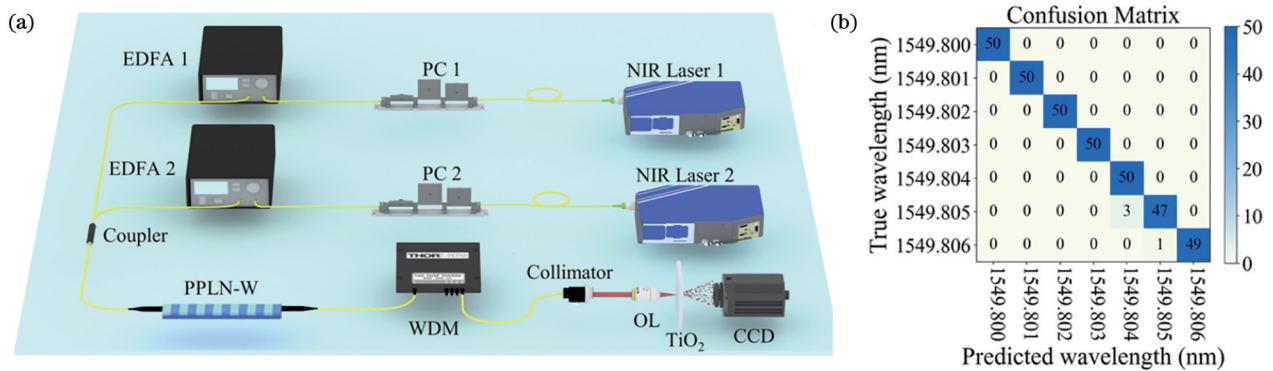


图 25 基于非线性频率转换的近红外散斑波长计<sup>[113]</sup>。(a)实验装置图；(b)波长检测的混淆矩阵

Fig. 25 Near-infrared speckle wavemeter based on nonlinear frequency conversion<sup>[113]</sup>. (a) Experimental setup; (b) confusion matrix for wavelength detection

#### 4.6 集成光学

近年来,得益于半导体材料和半导体加工工艺的逐渐成熟,集成光学得到了飞速发展。集成光学依靠晶圆级的制造技术在薄膜衬底上集成许多微纳光学元件,在实现光学系统的薄膜化、微型化和集成化方面发挥了重要作用。散射光场调控已被证明可用于实现片上散射光场的定向传输。2013年,Redding等<sup>[116]</sup>提出一种基于片上硅芯片的光谱仪,该芯片具有随机结构,如图 26 所示。待测信号经过该芯片会产生波长依赖的散斑图案,可在校准后用于入射光光谱恢复,此光谱仪具有 0.75 nm 的光谱分辨率,如图 26(b)所示。2016年,Sarma等<sup>[117]</sup>利用散射光场调控技术将光耦合到带有散射体的硅波导的开放和闭合通道,实现了对片上散射系统中能量分布的有效控制。实验中分别实现了波导中光能量的线性衰减、指数衰减等。2022年,

Bender等<sup>[118]</sup>提出了可以将入射光波前映射到散射波导内部场的“沉积矩阵”,通过激发波导的本征态来增强或减弱扩展目标区域的能量,这种能量的增强或减弱是由选择性传输本征通道间的相长或相消干涉引起的。Jang等<sup>[119]</sup>设计了一种具有确定输入-输出关系的超表面,相比于普通的散射介质,此超表面具有更强的光学记忆效应和更宽的散射范围。将散射光场调控与无序超表面结合可以实现高数值孔径( $NA > 0.5$ )聚焦。

#### 4.7 光计算

由于光子相较于数字电子具有更高效、更低功耗的特点,光计算引了人们极大的兴趣。相较于传统电计算,光计算具有大带宽、超高速、低能耗和低串扰等优点,在许多领域都具有应用潜力,特别是涉及高通量和实时数据处理的场景。散射光场调控具有足够多



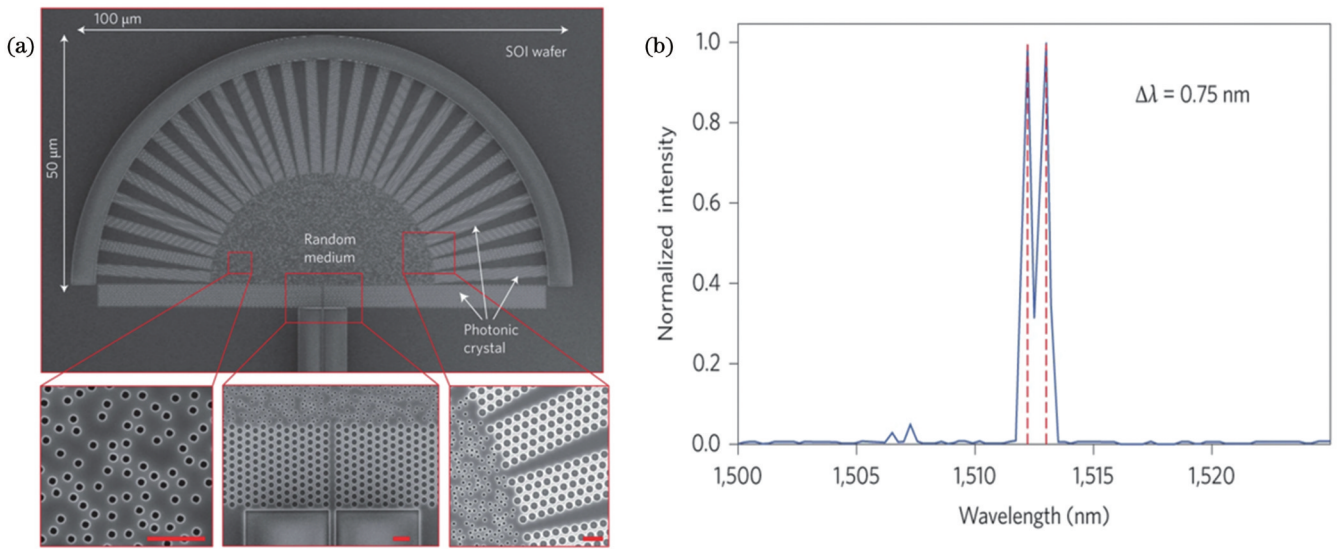


图 26 基于片上随机结构的光谱仪<sup>[116]</sup>。(a)扫描电子显微镜拍摄的光谱仪结构;(b)光谱分辨率

Fig. 26 Spectrometer based on on-chip randomized structure<sup>[116]</sup>. (a) Structure of the spectrometer obtained by scanning electron microscope; (b) spectral resolution of the spectrometer

的可调谐自由度,正成为实现可重构光计算的重点研究方案。Yu等<sup>[120]</sup>利用传输矩阵方法实现了基于散射介质的可重构光学逻辑门,实验中空间光调制器被划分为几个子区域,每个子区域通过传输矩阵计算的波前显示。每个调制波阵面透射通过散射介质形成期望的光场,构成不同的逻辑门器件。Matthès等<sup>[121]</sup>利用传输矩阵方法证实了可以使用复杂光学介质作为计算平台来执行线性运算,构建了多个 $16 \times 16$ 的线性算子并成功演示了基于此计算平台的离散傅里叶变换,计

算步骤如图 27 所示。人工智能目前已经被广泛应用到人类社会的生产生活中,但是受限于传统的计算平台,学习和预测大型复杂自然现象仍然是一项重大挑战。实现大型高效神经网络的一种常见方法是储备池计算,这是一种将输入信号映射到更高维计算空间的技术。Rafayelyan等<sup>[122]</sup>利用散射光场调控的方法实现了基于复杂光学介质的储备池计算,该方案的计算时间仅随光子节点数量线性增长,并成功实现了对大型时空非线性混沌系统的预测。

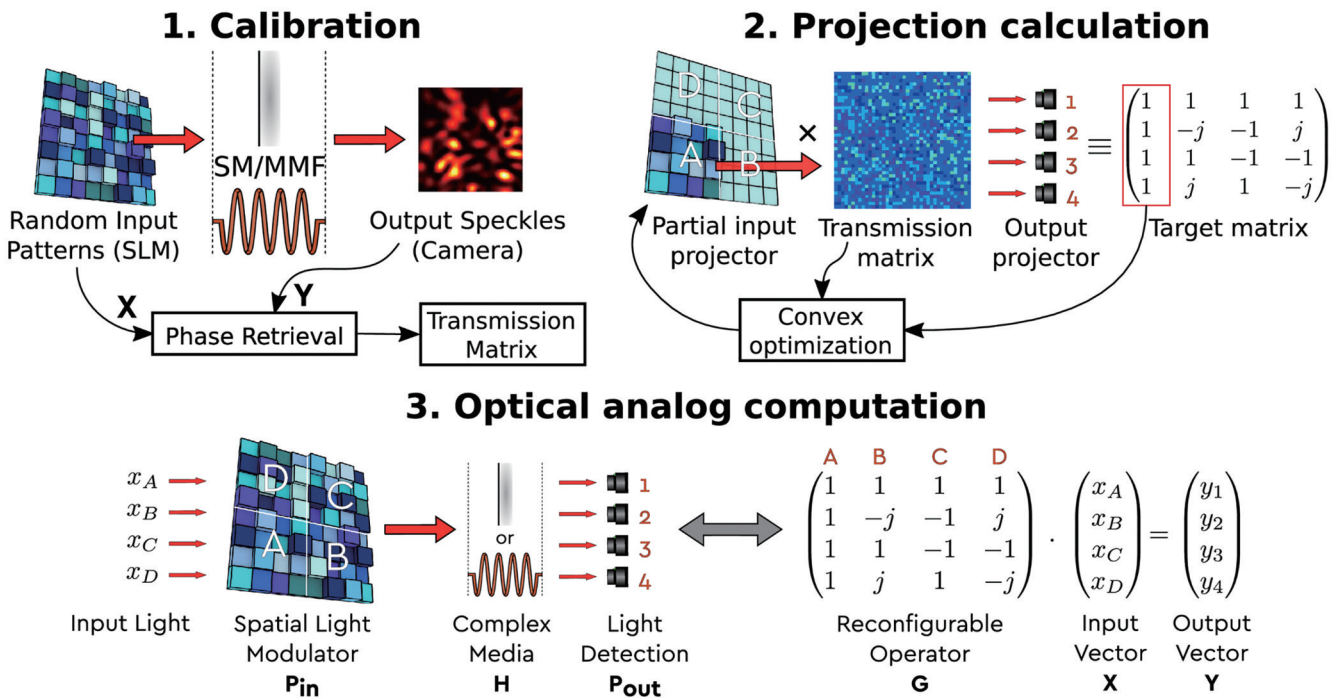


图 27 利用传输矩阵方法实现离散傅里叶变换的计算步骤<sup>[121]</sup>

Fig. 27 Computational steps for realizing the discrete Fourier transform via transmission matrix method<sup>[121]</sup>

## 5 总 结

介绍了散射光场的各个自由度的调控方法,以及散射光场调控在各领域的最新进展,比如利用散射光成像、强散射环境下的通信、散射光场调控在非线性光学、量子光学等领域的应用。尽管散射光场调控已经取得长足的发展,但是目前还存在一些重点和难点亟需突破:1)散射光的能量利用率较低,仅有部分散射光被完全调控;2)调制速度较慢,在一些动态的场景中需要实现实时散射光场调控;3)难以实现多物理量同时调控,目前大多数散射光调控仅可实现单一物理量的探测。随着优化算法、人工智能和调制器件的进一步发展,散射光场调控将朝着更精准、更高分辨率和更大探测深度的方向发展,而散射光场调控与强散射介质结合所产生的高自由度也将为新型光学元件的开发提供新的解决方案。我们相信,波前整形技术的进一步发展将会促使许多新应用的诞生。

### 参 考 文 献

- [1] Goodman J W. Some fundamental properties of speckle[J]. Journal of the Optical Society of America, 1976, 66(11): 1145-1150.
- [2] Huang D, Swanson E A, Lin C P, et al. Optical coherence tomography[J]. Science, 1991, 254(5035): 1178-1181.
- [3] Nasr M B, Saleh B E A, Sergienko A V, et al. Demonstration of dispersion-canceled quantum-optical coherence tomography[J]. Physical Review Letters, 2003, 91(8): 083601.
- [4] Kang S, Jeong S, Choi W, et al. Imaging deep within a scattering medium using collective accumulation of single-scattered waves[J]. Nature Photonics, 2015, 9: 253-258.
- [5] Freund I. Looking through walls and around corners[J]. Physica A, 1990, 168(1): 49-65.
- [6] Fink M. Time reversal of ultrasonic fields. I. Basic principles[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1992, 39(5): 555-566.
- [7] Vellekoop I M, Mosk A P. Focusing coherent light through opaque strongly scattering media[J]. Optics Letters, 2007, 32(16): 2309-2311.
- [8] Park J H, Yu Z P, Lee K R, et al. Perspective: wavefront shaping techniques for controlling multiple light scattering in biological tissues: toward *in vivo* applications[J]. APL Photonics, 2018, 3(10): 100901.
- [9] Popoff S M, Lerosey G, Carminati R, et al. Measuring the transmission matrix in optics: an approach to the study and control of light propagation in disordered media[J]. Physical Review Letters, 2010, 104(10): 100601.
- [10] Popoff S M, Lerosey G, Fink M, et al. Controlling light through optical disordered media: transmission matrix approach[J]. New Journal of Physics, 2011, 13(12): 123021.
- [11] Yu H, Hillman T R, Choi W, et al. Measuring large optical transmission matrices of disordered media[J]. Physical Review Letters, 2013, 111(15): 153902.
- [12] Vellekoop I M, Lagendijk A, Mosk A P. Exploiting disorder for perfect focusing[J]. Nature Photonics, 2010, 4: 320-322.
- [13] Huisman S R, Huisman T J, Goorden S A, et al. Programming balanced optical beam splitters in white paint[J]. Optics Express, 2014, 22(7): 8320-8332.
- [14] Boniface A, Mounaix M, Blochet B, et al. Transmission-matrix-based point-spread-function engineering through a complex medium[J]. Optica, 2017, 4(1): 54-59.
- [15] Mao Z Y, Liu H G, Chen X F. Active control of interconversion of spin and orbital angular momentum of light by a scattering system[J]. Physical Review Applied, 2022, 18(2): 024061.
- [16] de Aguiar H B, Gigan S, Brasselet S. Polarization recovery through scattering media[J]. Science Advances, 2017, 3(9): e1600743.
- [17] Tripathi S, Paxman R, Bifano T, et al. Vector transmission matrix for the polarization behavior of light propagation in highly scattering media[J]. Optics Express, 2012, 20(14): 16067-16076.
- [18] Cao Z Z, Zhang X B, Osnabrugge G, et al. Reconfigurable beam system for non-line-of-sight free-space optical communication[J]. Light: Science & Applications, 2019, 8: 69.
- [19] Tzang O, Caravaca-Aguirre A M, Wagner K, et al. Adaptive wavefront shaping for controlling nonlinear multimode interactions in optical fibres[J]. Nature Photonics, 2018, 12: 368-374.
- [20] Teğin U, Rahmani B, Kakkava E, et al. Controlling spatiotemporal nonlinearities in multimode fibers with deep neural networks[J]. APL Photonics, 2020, 5(3): 030804.
- [21] Qiao Y Q, Peng Y J, Zheng Y L, et al. Adaptive pumping for spectral control of broadband second-harmonic generation[J]. Optics Letters, 2018, 43(4): 787-790.
- [22] Miles R B, Lempert W R, Forkey J N. Laser Rayleigh scattering[J]. Measurement Science and Technology, 2001, 12(5): R33-R51.
- [23] Drake R M, Gordon J E. Mie scattering[J]. American Journal of Physics, 1985, 53(10): 955-962.
- [24] Campion A, Kambhampati P. Surface-enhanced Raman scattering[J]. Chemical Society Reviews, 1998, 27(4): 241-250.
- [25] Ippen E P, Stolen R H. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers[J]. Applied Physics Letters, 1972, 21(11): 539-541.
- [26] Tang L C, Huang J Y, Chang C S, et al. New infrared nonlinear optical crystal CsGeBr<sub>3</sub>: synthesis, structure and powder second-harmonic generation properties[J]. Journal of Physics Condensed Matter, 2005, 17(46): 7275-7286.
- [27] Kim M, Choi W, Choi Y, et al. Transmission matrix of a scattering medium and its applications in biophotonics[J]. Optics Express, 2015, 23(10): 12648-12668.
- [28] Zhang H K, Zhang B, Liu Q. OAM-basis transmission matrix in optics: a novel approach to manipulate light propagation through scattering media[J]. Optics Express, 2020, 28(10): 15006-15015.
- [29] Conkey D B, Brown A N, Caravaca-Aguirre A M, et al. Genetic algorithm optimization for focusing through turbid media in noisy environments[J]. Optics Express, 2012, 20(5): 4840-4849.
- [30] Yang J M, He Q Z, Liu L X, et al. Anti-scattering light focusing by fast wavefront shaping based on multi-pixel encoded digital-micromirror device[J]. Light: Science & Applications, 2021, 10(1): 149.
- [31] Woo C M, Zhao Q, Zhong T T, et al. Optimal efficiency of focusing diffused light through scattering media with iterative wavefront shaping[J]. APL Photonics, 2022, 7(4): 046109.
- [32] Liu Y, Lai P X, Ma C, et al. Optical focusing deep inside dynamic scattering media with near-infrared time-reversed ultrasonically encoded (true) light[J]. Nature Communications, 2015, 6: 5904.
- [33] Wang D F, Zhou E H, Brake J, et al. Focusing through dynamic tissue with millisecond digital optical phase conjugation[J]. Optica, 2015, 2(8): 728-735.
- [34] Ruan H W, Brake J, Robinson J E, et al. Deep tissue optical focusing and optogenetic modulation with time-reversed ultrasonically encoded light[J]. Science Advances, 2017, 3(12): eaa05520.
- [35] Cui M, Yang C. Implementation of a digital optical phase

- conjugation system and its application to study the robustness of turbidity suppression by phase conjugation[J]. *Optics Express*, 2010, 18(4): 3444-3455.
- [36] Jang M, Ruan H W, Zhou H J, et al. Method for auto-alignment of digital optical phase conjugation systems based on digital propagation[J]. *Optics Express*, 2014, 22(12): 14054-14071.
- [37] Turpin A, Vishniakou I, Seelig J D. Light scattering control in transmission and reflection with neural networks[J]. *Optics Express*, 2018, 26(23): 30911-30929.
- [38] Luo Y Q, Li H H, Zhang R C, et al. Deep learning assisted optical wavefront shaping in disordered medium[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10886: 1088612.
- [39] Luo Y Q, Yan S X, Li H H, et al. Towards smart optical focusing: deep learning-empowered dynamic wavefront shaping through nonstationary scattering media[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(8): B262-B278.
- [40] Cheng S F, Li H H, Luo Y Q, et al. Artificial intelligence-assisted light control and computational imaging through scattering media[J]. *Journal of Innovative Optical Health Sciences*, 2019, 12(4): 1930006.
- [41] Popoff S, Lerosey G, Fink M, et al. Image transmission through an opaque material[J]. *Nature Communications*, 2010, 1: 81.
- [42] Lee K R, Park Y K. Exploiting the speckle-correlation scattering matrix for a compact reference-free holographic image sensor[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13359.
- [43] Yaqoob Z, Psaltis D, Feld M S, et al. Optical phase conjugation for turbidity suppression in biological samples[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(2): 110-115.
- [44] Horstmeyer R, Ruan H W, Yang C. Guidestar-assisted wavefront-shaping methods for focusing light into biological tissue[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9: 563-571.
- [45] Vellekoop I M, Cui M, Yang C. Digital optical phase conjugation of fluorescence in turbid tissue[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(8): 081108.
- [46] Vellekoop I M, van Putten E G, Lagendijk A, et al. Demixing light paths inside disordered metamaterials[J]. *Optics Express*, 2008, 16(1): 67-80.
- [47] Vellekoop I M, Aegerter C M. Scattered light fluorescence microscopy: imaging through turbid layers[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(8): 1245-1247.
- [48] Boniface A, Dong J, Gigan S. Non-invasive focusing and imaging in scattering media with a fluorescence-based transmission matrix[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 6154.
- [49] Boniface A, Blochet B, Dong J, et al. Noninvasive light focusing in scattering media using speckle variance optimization [J]. *Optica*, 2019, 6(11): 1381-1385.
- [50] Katz O, Small E, Guan Y F, et al. Noninvasive nonlinear focusing and imaging through strongly scattering turbid layers[J]. *Optica*, 2014, 1(3): 170-174.
- [51] Kong F T, Silverman R H, Liu L P, et al. Photoacoustic-guided convergence of light through optically diffusive media[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(11): 2053-2055.
- [52] Caravaca-Aguirre A M, Conkey D B, Dove J D, et al. High contrast three-dimensional photoacoustic imaging through scattering media by localized optical fluence enhancement[J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 26671-26676.
- [53] Lai P X, Wang L D, Tay J W, et al. Photoacoustically guided wavefront shaping for enhanced optical focusing in scattering media[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(2): 126-132.
- [54] Chaigne T, Katz O, Boccara A C, et al. Controlling light in scattering media non-invasively using the photoacoustic transmission matrix[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8: 58-64.
- [55] Katz O, Ramaz F, Gigan S, et al. Controlling light in complex media beyond the acoustic diffraction-limit using the acousto-optic transmission matrix[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 717.
- [56] Si K, Fiolka R, Cui M. Fluorescence imaging beyond the ballistic regime by ultrasound pulse guided digital phase conjugation[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(10): 657-661.
- [57] Xu X, Liu H L, Wang L V. Time-reversed ultrasonically encoded optical focusing into scattering media[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(3): 154-157.
- [58] Guan Y F, Katz O, Small E, et al. Polarization control of multiply scattered light through random media by wavefront shaping[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(22): 4663-4665.
- [59] Xiong W, Hsu C W, Bromberg Y, et al. Complete polarization control in multimode fibers with polarization and mode coupling [J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 54.
- [60] Mosk A P, Lagendijk A, Lerosey G, et al. Controlling waves in space and time for imaging and focusing in complex media[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6: 283-292.
- [61] Aulbach J, Gjonaj B, Johnson P M, et al. Control of light transmission through opaque scattering media in space and time [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(10): 103901.
- [62] Katz O, Small E, Bromberg Y, et al. Focusing and compression of ultrashort pulses through scattering media[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5: 372-377.
- [63] McCabe D J, Tajalli A, Austin D R, et al. Spatio-temporal focusing of an ultrafast pulse through a multiply scattering medium[J]. *Nature Communications*, 2011, 2: 447.
- [64] Andreoli D, Volpe G, Popoff S, et al. Deterministic control of broadband light through a multiply scattering medium via the multispectral transmission matrix[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10347.
- [65] Mounaix M, Andreoli D, Defienne H, et al. Spatiotemporal coherent control of light through a multiple scattering medium with the multispectral transmission matrix[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(25): 253901.
- [66] Kim M, Choi Y, Yoon C, et al. Maximal energy transport through disordered media with the implementation of transmission eigenchannels[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6: 581-585.
- [67] Jeong S, Lee Y R, Choi W, et al. Focusing of light energy inside a scattering medium by controlling the time-gated multiple light scattering[J]. *Nature Photonics*, 2018, 12: 277-283.
- [68] Cao J, Yang Q, Miao Y S, et al. Enhance the delivery of light energy ultra-deep into turbid medium by controlling multiple scattering photons to travel in open channels[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 108.
- [69] Padgett M, Bowman R. Tweezers with a twist[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5: 343-348.
- [70] Kozawa Y, Matsunaga D, Sato S. Superresolution imaging via superoscillation focusing of a radially polarized beam[J]. *Optica*, 2018, 5(2): 86-92.
- [71] Cheng W, Zhang W, Jing H, et al. Orbital angular momentum for wireless communications[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2018, 26(1): 100-107.
- [72] Li L T, Zheng Y L, Liu H G, et al. Reconstitution of optical orbital angular momentum through strongly scattering media via feedback-based wavefront shaping method[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(10): 100101.
- [73] Tzang O, Niv E, Singh S, et al. Wavefront shaping in complex media with a 350 kHz modulator via a 1D-to-2D transform[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13: 788-793.
- [74] Liu Y, Ma C, Shen Y C, et al. Focusing light inside dynamic scattering media with millisecond digital optical phase conjugation[J]. *Optica*, 2017, 4(2): 280-288.
- [75] Blochet B, Bourdieu L, Gigan S. Focusing light through dynamical samples using fast continuous wavefront optimization [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(23): 4994-4997.
- [76] Choi Y, Yang T D, Fang-Yen C, et al. Overcoming the

- diffraction limit using multiple light scattering in a highly disordered medium[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(2): 023902.
- [77] Freund I, Rosenbluh M, Feng S. Memory effects in propagation of optical waves through disordered media[J]. *Physical Review Letters*, 1988, 61(20): 2328-2331.
- [78] Cao R Z, de Goumoens F, Blochet B, et al. High-resolution non-line-of-sight imaging employing active focusing[J]. *Nature Photonics*, 2022, 16: 462-468.
- [79] Turtaev S, Leite I T, Altwegg-Boussac T, et al. High-fidelity multimode fibre-based endoscopy for deep brain *in vivo* imaging[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 92.
- [80] Stellinga D, Phillips D B, Mekhail S P, et al. Time-of-flight 3D imaging through multimode optical fibers[J]. *Science*, 2021, 374(6573): 1395-1399.
- [81] Tay S, Blanche P A, Voorakaranam R, et al. An updatable holographic three-dimensional display[J]. *Nature*, 2008, 451(7179): 694-698.
- [82] Benton S A, Bove V M, Jr. *Holographic imaging*[M]. Weinheim: Wiley, 2007.
- [83] Liang J Y, Becker M F. Spatial bandwidth analysis of fast backward Fresnel diffraction for precise computer-generated hologram design[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(27): G84-G94.
- [84] Yu H, Lee K R, Park J, et al. Ultrahigh-definition dynamic 3D holographic display by active control of volume speckle fields[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11: 186-192.
- [85] Yu P P, Liu Y F, Wang Z Q, et al. Ultrahigh-density 3D holographic projection by scattering-assisted dynamic holography[J]. *Optica*, 2023, 10(4): 481-490.
- [86] Yang J M, Li L S, He Q Z, et al. An ultrahigh-fidelity 3D holographic display using scattering to homogenize the angular spectrum[J]. *Science Advances*, 2023, 9(41): eadi9987.
- [87] Willner A E, Ren Y X, Xie G D, et al. Recent advances in high-capacity free-space optical and radio-frequency communications using orbital angular momentum multiplexing[J]. *Philosophical Transactions Series A*, 2017, 375(2087): 20150439.
- [88] Willner A E, Huang H, Yan Y, et al. Optical communications using orbital angular momentum beams[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(1): 66-106.
- [89] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6: 488-496.
- [90] Bozinovic N, Yue Y, Ren Y X, et al. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers[J]. *Science*, 2013, 340(6140): 1545-1548.
- [91] Zhu L, Wang A D, Chen S, et al. Orbital angular momentum mode multiplexed transmission in heterogeneous few-mode and multi-mode fiber network[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(8): 1894-1897.
- [92] Gong L, Zhao Q, Zhang H, et al. Optical orbital-angular-momentum-multiplexed data transmission under high scattering[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 27.
- [93] Liu Z W, Huang Y W, Liu H G, et al. Non-line-of-sight optical communication based on orbital angular momentum[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(20): 5112-5115.
- [94] Leindecker N, Marandi A, Byer R L, et al. Broadband degenerate OPO for mid-infrared frequency comb generation[J]. *Optics Express*, 2011, 19(7): 6296-6302.
- [95] Wang C, Zhang M, Chen X, et al. Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages[J]. *Nature*, 2018, 562(7725): 101-104.
- [96] Li M X, Ling J W, He Y, et al. Lithium niobate photonic-crystal electro-optic modulator[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 4123.
- [97] Xu M Y, He M B, Zhang H G, et al. High-performance coherent optical modulators based on thin-film lithium niobate platform[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 3911.
- [98] He M B, Xu M Y, Ren Y X, et al. High-performance hybrid silicon and lithium niobate Mach-Zehnder modulators for 100 Gbit s<sup>-1</sup> and beyond[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13: 359-364.
- [99] Helmchen F, Denk W. Deep tissue two-photon microscopy[J]. *Nature Methods*, 2005, 2(12): 932-940.
- [100] Oheim M, Beaurepaire E, Chaigneau E, et al. Two-photon microscopy in brain tissue: parameters influencing the imaging depth[J]. *Journal of Neuroscience Methods*, 2001, 111(1): 29-37.
- [101] Burns P N, Simpson D H, Averkiou M A. Nonlinear imaging[J]. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 2000, 26: S19-S22.
- [102] Qiao Y Q, Peng Y J, Zheng Y L, et al. Second-harmonic focusing by a nonlinear turbid medium via feedback-based wavefront shaping[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(10): 1895-1898.
- [103] Moon J, Cho Y C, Kang S, et al. Measuring the scattering tensor of a disordered nonlinear medium[J]. *Nature Physics*, 2023, 19: 1709-1718.
- [104] Ni F C, Liu H G, Zheng Y L, et al. Nonlinear harmonic wave manipulation in nonlinear scattering medium via scattering-matrix method[J]. *Advanced Photonics*, 2023, 5(4): 046010.
- [105] Leedumrongwatthanakun S, Innocenti L, Defienne H, et al. Programmable linear quantum networks with a multimode fibre[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14: 139-142.
- [106] Defienne H, Barbieri M, Walmsley I A, et al. Two-photon quantum walk in a multimode fiber[J]. *Science Advances*, 2016, 2(1): e1501054.
- [107] Peng Y J, Qiao Y Q, Xiang T, et al. Manipulation of the spontaneous parametric down-conversion process in space and frequency domains via wavefront shaping[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(16): 3985-3988.
- [108] Defienne H, Reichert M, Fleischer J W. Adaptive quantum optics with spatially entangled photon pairs[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(23): 233601.
- [109] Valencia N H, Goel S, McCutcheon W, et al. Unscrambling entanglement through a complex medium[J]. *Nature Physics*, 2020, 16: 1112-1116.
- [110] Lib O, Hasson G, Bromberg Y. Real-time shaping of entangled photons by classical control and feedback[J]. *Science Advances*, 2020, 6(37): eabb6298.
- [111] Huang Y W, Qi Z T, Yang Y L, et al. Frequency-insensitive spatiotemporal shaping of single photon in multiuser quantum network[J]. *NPJ Quantum Information*, 2023, 9: 83.
- [112] Redding B, Cao H. Using a multimode fiber as a high-resolution, low-loss spectrometer[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(16): 3384-3386.
- [113] Sun Y W, Ni F C, Huang Y W, et al. Near-infrared speckle wavemeter based on nonlinear frequency conversion[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(15): 4049-4052.
- [114] Facchin M, Bruce G D, Dholakia K. Speckle-based determination of the polarisation state of single and multiple laser beams[J]. *OSA Continuum*, 2020, 3(5): 1302-1313.
- [115] Fickler R, Ginoya M, Boyd R W. Custom-tailored spatial mode sorting by controlled random scattering[J]. *Physical Review B*, 2017, 95(16): 161108.
- [116] Redding B, Liew S F, Sarma R, et al. Compact spectrometer based on a disordered photonic chip[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7: 746-751.
- [117] Sarma R, Yamilov A G, Petrenko S, et al. Control of energy density inside a disordered medium by coupling to open or closed channels[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(8): 086803.
- [118] Bender N, Yamilov A, Goetschy A, et al. Depth-targeted energy delivery deep inside scattering media[J]. *Nature Physics*, 2022, 18: 309-315.
- [119] Jang M, Horie Y, Shibukawa A, et al. Wavefront shaping with disorder-engineered metasurfaces[J]. *Nature Photonics*, 2018, 12: 84-90.

- [120] Yu Z P, Song Y C, Zhong T T, et al. Reconfigurable optical logic operations through scattering media with wavefront shaping[EB/OL]. (2022-01-19)[2023-11-09]. <http://arxiv.org/abs/2201.07432>.
- [121] Matthès M W, del Hougne P, de Rosny J, et al. Optical complex media as universal reconfigurable linear operators[J]. *Optica*, 2019, 6(4): 465-472.
- [122] Rafayelyan M, Dong J, Tan Y Q, et al. Large-scale optical reservoir computing for spatiotemporal chaotic systems prediction [J]. *Physical Review X*, 2020, 10(4): 041037.

## Methods and Applications of Scattering Light Field Manipulation (Invited)

Ni Fengchao<sup>1</sup>, Liu Haigang<sup>1\*</sup>, Chen Xianfeng<sup>1,2\*\*</sup>

<sup>1</sup>*State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;*

<sup>2</sup>*Shanghai Research Center for Quantum Sciences, Shanghai 201315, China*

### Abstract

**Significance** Light waves will propagate without distortion in a uniform medium according to its wave equation and are widely employed for energy and information transmission. However, absolutely uniform media do not exist in the real world, and there are various defects and impurities in various media, especially in completely disordered media. Small particles within the scattering medium can make light waves deviate from their original propagation direction, which results in a disordered light field, forms speckles, and thus hinders energy and information transmission. Since in the early stages scattering was believed to be irreversible, most conventional methods relied on extracting ballistic photons from the scattering photons to address scattering-induced aberrations. As the ballistic photons decay exponentially with the increasing propagation distance, and it is difficult to extract ballistic photons from scattering photons after a certain depth, scattering correction based on ballistic photons is only applicable to weakly scattering media.

With the rapid development of spatial modulation devices such as spatial light modulators and digital micromirrors, it has become possible to realize the spatial light modulation with high accuracy. In 2007, Vellekoop and Mosk proposed a landmark new technique based on spatial light modulators that can compensate for the strong scattering effect, which is the wavefront shaping method to pre-compensate for the wavefront aberrations due to scattering by iteratively optimizing the wavefront of the input light. Meanwhile, the scattering light field manipulation has become possible. Additionally, light propagation in complex media is characterized by the transmission matrix. In just over a decade, scattering light field manipulation based on the wavefront shaping method has been widely adopted in many fields. For example, wavefront shaping methods can be employed to achieve light focusing beyond the diffraction limit by strongly scattering media and compensate for light scattering effects, further enabling high-resolution imaging at high transmission depths. In addition to the imaging field, scattering light field manipulation can transform the inherently harmful scattering medium into a variety of optical elements such as beam splitters, angular momentum generators and converters, and polarization controllers. In the field of communication, the scattering light field manipulation can increase the scattering light intensity received by an optical receiver and realize high-speed non-line-of-sight communication with lower power consumption. Additionally, mode selection of the outgoing field of a multi-mode fiber can be performed by scattering light field manipulation and the spectrum modulation of a nonlinear output field.

**Progress** We focus on scattering light field manipulation, introduce the research progress in related fields and highlight the new applications of scattering light field manipulation in various research fields. Meanwhile, we first introduce the light field scattering characteristics, followed by the introduction of scattering and its light field modulation methods based on transmission matrix, feedback-based wavefront shaping, optical phase conjugation, and artificial intelligence-assisted wavefront shaping. Subsequently, the studies of the modulation methods of multiple degrees of freedom of the scattering light field, such as spatial (Figs. 1–3), polarization (Figs. 4–5), spectral (Figs. 6–8), energy (Fig. 9), and orbital angular momentum (Fig. 10) are presented. Finally, the existing applications in various fields of scattering light field manipulation are introduced. For example, the fluorescence-based transmission matrix is employed to achieve non-invasive imaging of biological tissues (Fig. 12). Orbital angular momentum communications in a complex environment are realized by exploiting the transmission matrix method (Fig. 18). Manipulation of nonlinear scattering optical field is achieved by adopting the transmission matrix method (Fig. 22). Scattering compensation of entangled photon pairs is performed by

optimizing the pump wavefront (Fig. 24). Discrete Fourier transform can be achieved by utilizing the transmission matrix method (Fig. 27).

**Conclusions and Prospects** In summary, we introduce in detail the manipulation methods of each degree of freedom of the scattering light field, and the latest progress of the scattering light field manipulation in various fields, such as imaging, optical communication, nonlinear optics, quantum optics, optical sensing, integrated optics, and optical computing. Although scattering light field manipulation has made great progress, there are still some limitations to be broken through. 1) The energy utilization of scattering light is low with only part of the fully modulated scattering field. 2) The modulation speed is slow, and real-time scattering light field manipulation should be realized under dynamic scenarios. 3) It is difficult to modulate multiple physical quantities simultaneously, and most of the scattered light modulation can only realize the manipulation of a single physical quantity. With the further development of optimization algorithms, artificial intelligence, and modulation devices, scattering light field manipulation will move towards more precision, higher resolution, and deeper detection depth. The high degree of freedom brought by the combination of scattering light field manipulation and strong scattering media will also provide new solutions for the development of new optical components in the future. We believe that the further development of scattering light field manipulation will lead to many new applications.

**Key words** physical optics; scattering; light field modulation; wavefront shaping; transmission matrix