

# 超常规光学透视成像研究进展\*

## —— 散射光成像技术介绍

和河向<sup>1,2</sup> 周建英<sup>1,†</sup>

(1 中山大学物理学院 光电材料与技术国家重点实验室 广州 510275)

(2 广东第二师范学院 物理与信息工程系 广州 510303)

2016-07-12收到

† email: stszjy@mail.sysu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20161006

## Optical imaging beyond conventional limits

### —— An introduction to scattering light imaging techniques

HE He-Xiang<sup>1,2</sup> ZHOU Jian-Ying<sup>1,†</sup>

(1 State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, School of Physics, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

(2 Department of Physics, Guangdong University of Education, Guangzhou 510303, China)

**摘要** 光学成像是人类获取信息的最重要手段,传统成像方法难以克服光在传播过程中遇到的散射干扰,当天文望远、生物显微、医学成像甚至日常生活观察等众多场合遇到散射影响时无法获得高质量的图像。如何在存在散射影响的情况下实现光学成像是人们长久以来渴望解决的基本光学问题之一。随着科技的发展,对这一问题的研究取得了不少突破。文章对这些突破和进展进行了讨论,并重点介绍了利用光场调控和解卷积成像技术实现透过散射体成像恢复的研究进展。

**关键词** 散射成像,光场调控,相位共轭,解卷积成像,透过散射体聚焦

**Abstract** Optical imaging is an important means for mankind to acquire information. However, in the presence of scattering it is difficult to obtain good quality images by conventional imaging methods, for example, in astronomy, bio-medical microscopy, and even daily observation. This is not only a fundamental optics issue but also a long-standing problem that has yet to be solved. Thanks to the development of science and technology, great breakthroughs have been made in recent years. In this letter, the latest progress in the technique of imaging through scattering media by light field modulation and de-convolution methods is described and discussed.

**Keywords** scattering light imaging, light field modulation, phase conjugation, deconvolution imaging, focusing through scattering medium

\* 国家自然科学基金(批准号: 11534017)、国家重点基础研究发展计划(批准号: 2012CB921904)、广东第二师范学院博士专项经费(批准号: 2015ARF19)资助项目

## 1 引言

人类认识世界获取知识的过程,有80%是通过视觉系统实现的。人们从一开始只能观察肉眼可见的世界,到后来在光学成像工具的帮助下,观察到了更远、更小、更快的事物。光学成像领域一直在快速的发展当中。然而时至今日,仍有一些最基本的问题有待解决,最典型的就是成像过程中散射的影响。

两千多年前,《淮南子·原道训》曾记载:“离朱之明,察箴末于百步之外,不能见渊中之鱼”。当时的古人总结出“不能见渊中之鱼”是由于水中杂质对光的散射而引起的,跟视力水平无关。“雾里看花,终隔一层”,光的散射影响人们对事物的观察。随着社会的发展变迁,人们越发经常地遇到同类问题的困扰。例如,雾霾雨雪天气使能见度低下,给交通安全生活生产带来不便;火灾现场的浓烟和热气流,给消防员的搜救和遇险者的逃生造成障碍;生物学显微、诊断和治疗中,不透明的组织使生物体内部的成像十分困难;陆基天文望远镜受到大气湍流的影响,成像畸变分辨率下降等。避免光的散射是在这种情况下提高成像质量最直接的方法。例如,将天文望远镜修建在高山上或者把它送至外太空以降低地球大气的散射影响。然而在多数情况下,散射介质与观察对象共同存在,散射的影响无法简单地移除。传统的成像方法在散射的影响下并不能获得图像。这种看不透说不明的事物激发了人们强烈的求知欲望。“看透”遮挡在视线前面的散射物在科学、民用、医学、国家安全以及军事应用中具有重要的科学与技术价值。此外,人们在烦恼散射带来不便的同时也在享受它的一些好处。例如,人们常常利用散射体(如衣服、窗帘与磨砂窗等)来保护自己的隐私。发展超常规的散射光成像技术,能够为监控窥探带来新方法的同时,也给信息安全提出新的挑战。在这一方向的深入讨论将带来丰富的研究内容。

光经过散射作用之后,入射光携带的信息并没有丢失。它们只是在散射过程中进行了重新组

合。人们相信,能够利用某种方法从散射光中重组并恢复出原有的信息。随着近年来光散射理论与实验技术的不断进步,透过散射体实现成像的研究获得了快速发展,涌现出了一系列突破性的研究成果。光学选通<sup>[1]</sup>、自适应光学<sup>[2-4]</sup>、光学相干层析<sup>[5]</sup>、超快激光飞行时间成像法<sup>[6]</sup>、测量散射矩阵<sup>[7, 8]</sup>、光场调控<sup>[9-11]</sup>、散斑相关<sup>[12, 13]</sup>等方法都在各自适用的情景下取得了透过散射体的光学成像结果。本文将分别介绍基于光场调控技术和反卷积散斑相关技术实现的散射光成像方法的研究进展,并在此基础上探讨了光场调控在实现光透过散射体的能量汇聚中的应用。借助本文介绍的成像技术,透过散射体后的实时、彩色与高保真光学成像已经成为可能。

## 2 光场调控技术在克服散射影响实现透过散射体的光学成像中的应用

### 2.1 基于光场调控技术的散射体光学成像原理简介

#### 2.1.1 散射通道的相干叠加和记忆效应

光在均匀介质中沿直线传播,是光学的基本结论。它从“一叶障目不见泰山”类似的对日常生活的观察中总结而来。另一方面,光在不均匀的介质中传播时,它的传播方向通常会发生改变。光的散射即定义为光偏离原来的方向传播而弥散到其他任意方向的现象。入射到散射介质中的相干光,可以看作由无数多的小光束组合而成。假设第*i*个小光束经过散射介质后相位增加了 $\varphi_i$ 。不同的小光束在散射介质中经历的传播路径都不相同,因此 $\varphi_i$ 的分布是随机的。最终这些小光束出射后在接收屏上进行相干叠加,得到任意一点的光强为

$$I = \left| \sum_i E_i e^{j\varphi_i} \right|^2 \quad (1)$$

光场的相干叠加如图1(a)所示:小光束*i*的散射光在该点的复振幅用黑色矢量表示;红色矢量为所有小光束的散射光叠加的结果。接收屏上不同位置的叠加过程具有一定的随机性,因此最终观察到的图样是颗粒状的散斑。如图1(b)所示,如果能够让每一个小光束在入射散射体前都附带上某

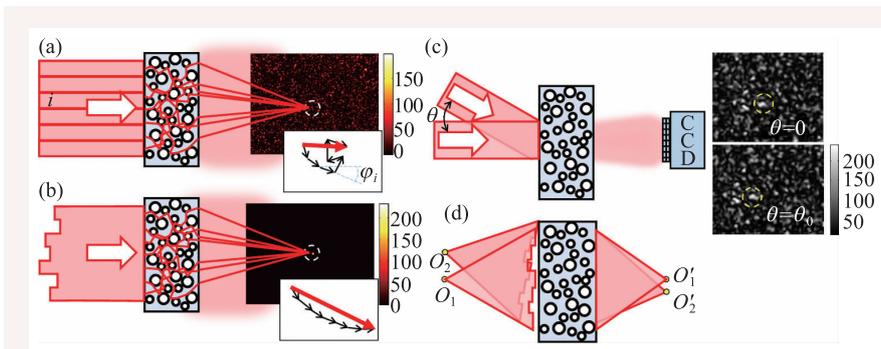


图1 基于光场调控技术实现的散射体成像的原理示意图 (a)入射光经过散射体后,在接收屏上形成颗粒状的散斑图样;(b)每束小光束经过一定的调制,使得接收屏上某一个点的散射光相长叠加,形成聚焦亮点;(c)散射体的记忆效应示意图(CCD为电荷耦合器件);(d)光场调控实现的散射成像示意图

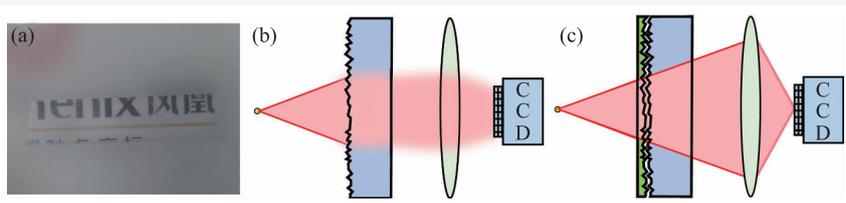


图2 抵消散射体的散射效应 (a)透过粘有透明胶的磨砂玻璃观察到后面的物体(图中的粗字体);(b)散射体导致成像系统不能对物光进行有效的汇聚;(c)与散射体散射效应互补的调制(如绿色所示的互补的粗糙平面)消除了散射体的散射效应,从而能对物光进行有效的汇聚

个相位延迟,使得散射光在空间中某特定位置进行叠加时保持相位相同,形成聚焦亮点,那么该点的光强比起接收平面上其他位置都强很多。从整体上看,等效于散射光在该点重新实现了聚焦<sup>[14]</sup>。调控每一束入射光的参数的方法称之为光场调控技术。

利用光场调控技术实现散射成像的物理基础是薄散射体的光学记忆效应。图1(c)为对比不同角度( $0^\circ$ 角和 $\theta_0$ 角)入射的两束光所产生的散斑图,人们发现它们的散斑在形状上基本类似,只是在空间上发生了平移。对应于入射方向不同的光所产生的散斑仍具有相关性,这样的现象称为散射体的光学记忆效应<sup>[15-17]</sup>。因此,首先对某一个物点(图1(d)中的 $O_1$ )发出的光进行光场调控,使其在通过散射体之后能够在像平面获得一个高对比度的聚焦点(图1(d)中的 $O'_1$ )。根据散射体的记忆效应,该物点附近的所有其他物点(图1(d)中的 $O_2$ ),都能够利用同样的光场调控方法在像平面获得对应的像点(图1(d)中的 $O'_2$ )。在这样的调控下,散射体的行为跟普通的透镜成像系统相类似,即存在线性平移不

变性(在这种情况下具有一一对应的物像关系)。因此可以认为,薄散射体被转化成为了一个“成像透镜”<sup>[18]</sup>(图1(d))。

### 2.1.2 薄散射体散射作用的补偿

人们在日常生活中发现,将透明胶粘贴在磨砂玻璃上,磨砂玻璃将变得透明,甚至可以透过磨砂玻璃观察到后面的物体(图2(a))。磨砂玻璃依靠磨砂面的凹凸不平对光线进行散射,它透光但不透明。当磨砂玻璃被贴上透明胶后,它表面的微结构跟透明胶紧紧吻合,凹凸不平的表面被抹平。磨砂玻璃的散射作用变弱了,因而人们能够观察到它后面的事物。古人所说的

“玉不琢不成器”也是同样现象:没打磨过的玉石表面凸凹不平,漫反射使其黯淡无光;抛光后的玉石表面光滑,光线发生镜面反射使其晶莹剔透。因此,克服散射的影响实现成像,可以采用另一种解决方法,抵消散射体的散射作用。一般情况下,散射使成像系统无法对物光波进行有效的汇聚(图2(b))。对散射效应的补偿可以通过产生一个互补的粗糙平面(图2(c))来实现。“互补平面+散射体”这样的组合相当于把散射体粗糙的表面给抹平了。因此我们能够利用这样的方法实现物体能够透过散射体成像。“互补平面”的产生可以使用光场调控技术或者相位共轭器件实现。

## 2.2 基于光场调控技术实现的散射体光学成像技术实验探究

### 2.2.1 光场调控结合入射光扫描实现大角度的透过散射体成像

光场调控实现散射光成像恢复的关键在于如

何对光进行合理的调控,使得物像平面之间实现一一对应的成像关系。光场调控的核心器件是空间光调制器(spatial light modulator,简称SLM)。SLM能够将光束离散化并且独立地对每一个小光束实施振幅、相位和偏振的控制。多维度的相位调控中每个小光束的相位调制值在空间排列形成一幅相位分布图。散射成像所需的调控相位分布可以通过牛顿迭代法、模拟热退火算法、遗传算法等最优化算法搜索得到<sup>[19]</sup>。

利用光场调控实现透过散射体成像的系统如图3(a)所示:散射体通过透镜 $L_1$ 和 $L_2$ 投影在SLM上,被SLM调制的散射光经透镜 $L_3$ 收集后进入电荷耦合器件(charge couple device,简称CCD)。如果光路中没有调制,则只能在CCD上观察到一些散斑(图3(c))。散射光成像所需的光场调制相位分布通过已知的参考物(例如图3(b)所示的字符“S”)和遗传算法<sup>[20]</sup>搜索得到(图3(a))。这一调制能够使得系统在CCD上获得参考物体的像(图3(d))。此时利用散射体的记忆效应,将参考物换成其他任意的未知待测物体,它们都能通过同样的调制而成像(图3(e), (f))。进一步可以使用扫描入射光的方法观察尺寸更大的待测物体。如图3(a)所示,利用待测物体其中已知的“S”作为参考搜索出波前调控所需的相位分布,然后扫描入射光至其他未知的待测区域,则能获知待测区域的所有信息<sup>[21]</sup>(图3(g))。

这种方法利用散射光实现对已知物体周围待测物体的探测,达到了“窥一斑而知全豹”的效果。该方法不仅能够对掩藏在透射型散射体后的物体进行探测,也能够对反射型的散射体实施探测,比如说能够通过墙壁的漫反射观察到墙壁另一边的物体。光场调控实现的散射光成像在一定程度上等同于将散射体变成透明,或者把

粗糙的墙壁变成“镜子”一般。

## 2.2.2 利用相位共轭技术进行波前补偿实现物体透过散射体的成像

调控相位通过SLM和CCD的迭代搜索得到。这一过程较为耗时,难以应对动态的散射环境。根据本文2.1.2节的描述,我们还可以用补偿散射体的散射效应来实现散射光成像。在2.2.1节的实验基础上,我们对系统进行改进,大大提高了成像的速度。具体的实验装置如图4(a)所示。系统对点光源的响应反映了它的散射程度。利用相位恢复的方法<sup>[22]</sup>测得的点光源产生的散射光的复振幅如图4(b)(振幅)和图4(c)(相位)所示。薄散射体的散射作用是由于表面的凹凸不平造成的。因此抵消它的散射效应只需要产生跟它的凹凸变化互补的波前即可(图2(c)所示的绿色平面)。因此光场调控所需的波前可以通过对图4(c)进行相位共轭再叠加上一个菲涅尔透镜相位(图4(d))得到(图4(e))。通过它,能够补偿散射体的散射效应并在CCD上重现参考点光源的像(图4(f))。也就是通过图4(e)所示的光场调控建立起了物像平面之间一一对应的成像关系。此时,把参考点光源换成其他任意的未知待测物体,都能够实现待测物体透过散射体的成像恢复,结果如图4(g)~(i)所示。

这一改进的方法不需要进行SLM和CCD的来

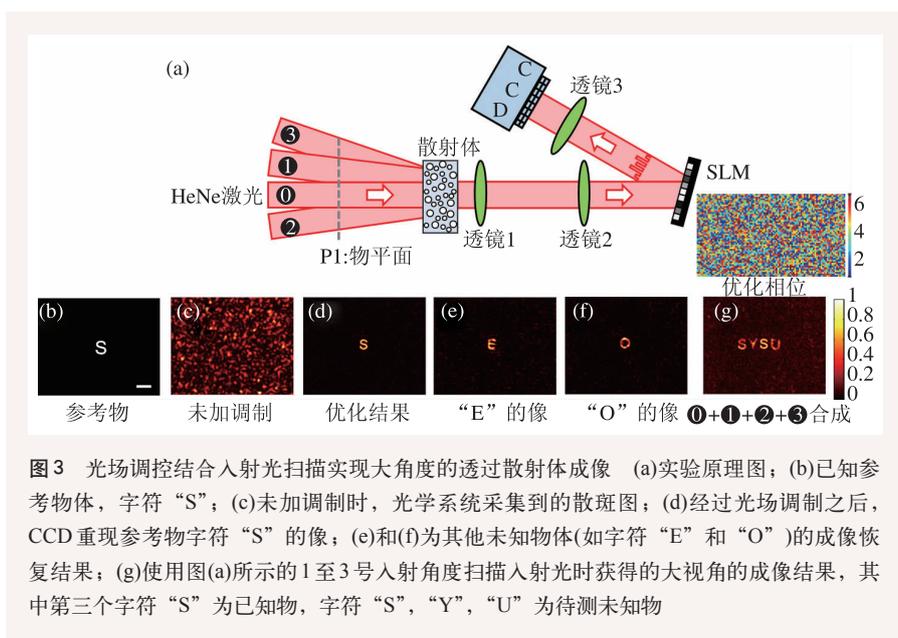


图3 光场调控结合入射光扫描实现大角度的透过散射体成像 (a)实验原理图; (b)已知参考物体,字符“S”; (c)未加调制时,光学系统采集到的散斑图; (d)经过光场调制之后,CCD重现参考物字符“S”的像; (e)和(f)为其他未知物体(如字符“E”和“O”)的成像恢复结果; (g)使用图(a)所示的1至3号入射角度扫描入射光时获得的大视角的成像结果,其中第三个字符“S”为已知物,字符“S”,“Y”,“U”为待测未知物

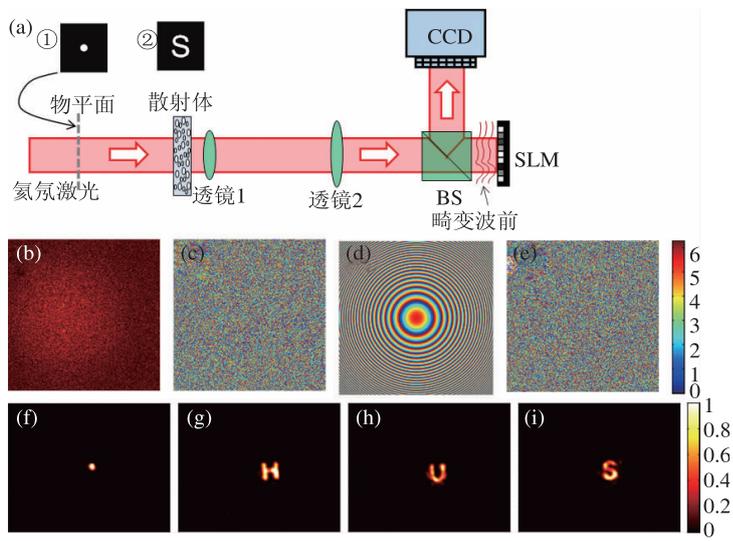


图4 利用相位共轭进行波前补偿实现物体透过散射体的成像方法 (a)实验装置图; (b)和(c)分别为利用波前检测方法测量得到的点光源通过散射体后的振幅分布和相位分布; (d)焦距为138.4 mm的非涅尔透镜相位; (e)散射成像所需的相位分布; (f)通过波前补偿之后在CCD得到的参考点光源的像; (g), (h), (i)分别为字符“H”、“U”、“S”的成像恢复结果

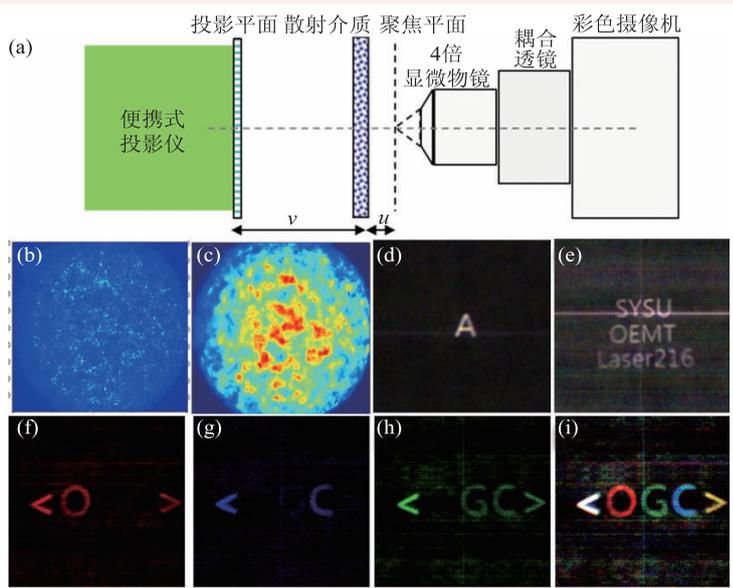


图5 基于图像解卷积实现的彩色物体透过散射体的实时大角度成像恢复方法 (a)实验原理图; (b)系统的PSF; (c)物体“A”通过系统后所形成的散斑; (d)散射图像恢复结果; (e)大角度成像恢复结果; (f), (g), (h)分别为红、蓝、绿通道成像恢复结果; (i)彩色物体成像恢复合成结果

回迭代, 所以实际操作相对来说更为简单。此外, 该技术在额外增加系统复杂程度的基础上成像速度比使用遗传算法的方法有约两个数量级的提高<sup>[23, 24]</sup>。速度的提高使得该方法有望能够应对更

加复杂的散射环境, 比如说雨雾沙尘、活体生物组织等场合。

### 3 基于解卷积方法实现的彩色物体透过散射体的实时大角度成像恢复

由2.1.1节的讨论可知, 在记忆效应范围内, 薄散射体是一个线性平移不变的系统<sup>[25]</sup>。所以在非相干光照明情况下, 物体O透过散射体在像平面上形成的散斑的强度分布I可以表示为<sup>[26]</sup>:

$$I = O * PSF, \quad (2)$$

式中的O代表物体的强度分布, PSF称为系统的点扩散函数(point spread function, 简称PSF), \*代表卷积操作。散斑是由物平面上光轴附近的点光源在像平面上产生的。公式(2)表明, 通过散斑的强度分布I和PSF的解卷积可以恢复出待测物体O的信息。基于解卷积方法的成像方案如图5(a)所示: 放置在物平面的投影仪用于产生待测物体, 物体透过散射体所产生的散斑通过一个4倍的显微物镜和一个透镜组成的光学系统后被CCD采集。整个系统使用白光LED进行照明。图5(b)所示的是测量得到的系统的PSF。图5(c)所示的是待测物体(字符“A”)通过系统后产生的散斑。图5(d)是图5(b)和(c)进行解卷积得到的结果。它重现出了待测物体的图像。该方法使用显微物镜对散射光进行收集, 它能够收集具有高相关性的散射光同时过滤了与成像无关的杂散光。因此该方法能够实现大角度高质量的

成像恢复(图5(e))。除此以外, 由于系统所用的照明光是宽带的非相干光源, 我们能够利用CCD自带的彩色滤镜阵列实现彩色的待测物体的散射成像。具体方法如下: 对于红绿蓝三个颜色通道, 分

别采集对应的PSF和待测物体的散斑并进行解卷积操作，最后将它们合成即得到彩色的原待测物体。图5(f)–(h)分别为待测物体的红、蓝、绿通道的成像恢复结果。图5(i)为彩色物体的合成恢复结果。该方法的处理速度非常快(解卷积计算仅需1 ms)。它能够实现对单色或者彩色待测物体实时的成像恢复。

这一方法简化了散射光成像的过程。它利用有针对的光路设计，并结合散射体的特性，在成像速度、系统可视范围和成像质量上获得较大的提高<sup>[27]</sup>。在毫秒量级内实现散射光的成像，这样的结果使得透过活体生物组织观察内部细胞的运动变化变得可能。该方法可以分辨不同的颜色，从某种意义上来说，它具有一定程度上的光谱分辨能力。因此该方法能够透过散射体获得更丰富的信息。较快的成像速度和光谱分辨能力，使得该技术有望在可穿戴式器件上获得应用和发展。此外，该方法能够利用日常生活中常见的器件实现，较容易实现大范围的应用推广。

## 4 光场调控实现透过生物组织光能的汇聚

一般来说，大多数不透明的生物组织对光都会产生散射。如图6(a)所示，手电筒的光透过手掌之后，变成了一团光晕。生物组织的散射作用阻碍了光能量的传递。它也是光学治疗需要面对的一大难题。光学治疗是指将光能汇聚在病变组织对其实现加热的方法。它具有非接触、创伤小、副作用小等优势，近年来得到了越来越多的关注。比如说在脑部肿瘤的治疗过程中，人们不希望通过手术破坏硬脑膜(图6(b))的完整性，而放射性治疗方法又会带来严重的副作用。这种情况下，光学治疗是一个很好的选择。然而，如何穿透不透明的硬脑膜是急需解决的问题。利用光场调控的方法能够突破散射体的这种限制。

我们利用光场调控方法演示了透过生物体的光能汇聚，实验装置如图6(d)所示。实验所使用的生物样品是一片成年大鼠硬脑膜(图6(c))。通过调控入射光，我们能够在散射体后的特定位置得到一个高对比度的亮斑(图6(e))，它的光强是周围其它地方的100多倍。此外，采用如图6(f)所示的多光束波前调制相干合成的方法能够获得更强的聚焦效果和更为精准的焦点定位<sup>[28]</sup>。我们通过对两束不同入射方向的相干光分别进行最优化波前调控和调整它们之间的相对相位，实现了目标区域焦点合成光强“1+1>2”的效果(图6(g))。这样的方法类似于“伽马刀”。多光束聚焦点的相干合成，有望在不损坏表面散射组织的前提下对目标区域直接实现光学加热的效果。这一成果将极大地推进光学治疗应用在临床医学中的步伐，为未来的治疗方法提供新的途径。

## 5 结束语

本文主要通过介绍两种不同的技术：光场调控技术和解卷积成像方法，讨论了如何实现透过散射体观察隐藏在散射体后的事物这一问题。本

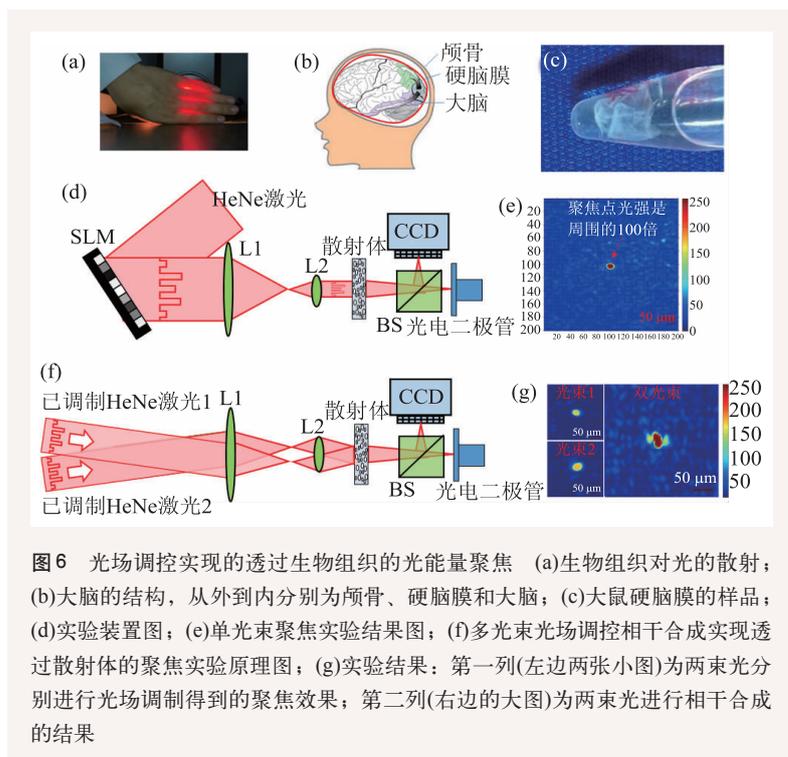


图6 光场调控实现的透过生物组织的光能量聚焦 (a)生物组织对光的散射；(b)大脑的结构，从外到内分别为颅骨、硬脑膜和大脑；(c)大鼠硬脑膜的样品；(d)实验装置图；(e)单光束聚焦实验结果图；(f)多光束光场调控相干合成实现透过散射体的聚焦实验原理图；(g)实验结果：第一列(左边两张小图)为两束光分别进行光场调制得到的聚焦效果；第二列(右边的大图)为两束光进行相干合成的结果

文分别介绍了这两种技术的实现原理和具体的实验方法。通过光场调控和薄散射体的记忆效应,建立起散射系统一一对应的物象关系,能够实现透过散射体的恢复成像。光场调控所需的相位分布可以用相位共轭的方法获得,能够直接补偿散射体的散射效应,具有更快速的成像速度和更好的成像质量。此外,由于薄散射体在一定范围内具有空间平移不变性,因此在非相干光照明情况下可以直接通过系统的PSF和待测物体的散斑的解卷积获得待测物体的像。这种解卷积成像方法能够实现非相干光情况下彩色物体透过散射体的实时大角度的高质量成像恢复。透过生物组织进行光能的操纵是光与散射物质作用的问题的另一个重要应用。本文还介绍了利用光场调控实现的光能量透过散射体的定向传递,这一技术有望实现能量的局域汇聚并有望利用到光学治疗中。

散射光在通常的观念中是不利于成像和光传播的。本文通过对这一问题的讨论,给人们在散射光的利用方面提供了一些新的解决方法。原来被认为毫无用处的信息被重新挖掘和利用,有利于信息的最大化利用,同时人们对世界的认知能力也将得到扩展。例如,人们可以直接用光学方法观察到生物组织内部的信息;即便在不利的天气环境下仍能进行光学成像;利用周围环境的漫反射使得监控摄像头再无“死角”可言等。技术

的发展使得人们有望实现形如漫画人物超人的“透视眼”功能。在欣喜获得新技能的同时,散射成像也会对一些领域带来巨大的挑战。比如广泛用于保证隐私和采光的需要的透光但不透明的建筑材料(如窗帘、毛玻璃等),在这些技术下将有可能变得毫无用处,人们有可能窃取其中的信息。俗话说得好“没有不透风的墙”,原则上只要有一丝散射光漏出,便有可能从中解调出有用的信息。因此该技术的发展使得监控和窥探的方法变得更加高明的同时,也对反监视和保密提出了新的问题。这时候,不仅要小心“隔墙有耳”,更要注意“隔墙有眼”了。

最后需要指出的是,文中提到的技术并不完美,在它们开展广泛的实际应用之前仍存在很多的局限性需要解决。比如说,文中提到的技术在实现成像之前一般都需要参考物体的协助,这在非入侵式的检测应用中带来困难。还有,它们多数只能使用于散射程度较弱的散射体,对于厚散射体的成像恢复方法仍有待研究。但该领域的快速发展,我们有理由乐观的相信,所有的这些问题将得到有效的解决。随着探索的深入,我们在认识世界和处理光散射这一问题上将获得更深层次的了解。

**致谢** 感谢汕头大学物理系谢向生博士以及中山大学物理学院庄辉昌同学的讨论。

## 参考文献

- [1] Gu M *et al.* Microscopic Imaging Through Turbid Media. Springer, 2015
- [2] Graydon O. Nature Photon., 2011, 5(1): 15
- [3] Wang K *et al.* Nat. Commun., 2015, 6: 7276
- [4] Booth M J. Light Sci. Appl., 2014, 3: e165
- [5] Huang D *et al.* Science, 1991, 254(5035): 1178
- [6] Velten A *et al.* Nat. Commun., 2012, 3: 745
- [7] Chaigne T *et al.* Nature Photon., 2014, 8(1): 58
- [8] Yu H *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 111(15): 153902
- [9] Vellekoop I M *et al.* Nature Photon., 2010, 4(5): 320
- [10] Horstmeyer R *et al.* Nature Photon., 2015, 9(9): 563
- [11] Vellekoop I M. Opt. Express, 2015, 23(9): 12189
- [12] Bertolotti J *et al.* Nature, 2012, 491(7423): 232
- [13] Katz O *et al.* Nature Photon., 2014, 8(10): 784
- [14] Vellekoop I M. arXiv preprint, 2008, arXiv:0807.1087
- [15] Freund I *et al.* Phys. Rev. Lett., 1988, 61(20): 2328
- [16] Feng S *et al.* Phys. Rev. Lett., 1988, 61(7): 834
- [17] Judkewitz B *et al.* Nature Phys., 2015, 11(8): 684
- [18] Katz O *et al.* Nature Photon., 2012, 6(8): 549
- [19] Vellekoop I M, Mosk A P. Opt. Commun., 2008, 281(11): 3071
- [20] Conkey D B *et al.* Opt. Express, 2012, 20(5): 4840
- [21] He H *et al.* Opt. Express, 2013, 21(10): 12539
- [22] Zhang F *et al.* Phys. Rev. A, 2007, 75(4): 043805
- [23] He H, Wong K S. Proc. SPIE, 2016, 9717: 97170Q-1
- [24] He H, Wong K S. Journal of Optics, 2016, 18(8): 085604
- [25] Isaac F. Physica A, 1990, 168(1): 49
- [26] Xie X *et al.* Phys. Rev. Lett., 2014, 113(26): 263901
- [27] Zhuang H *et al.* Scientific Report, 2016, 6: 32696
- [28] Wang F *et al.* Biomedical Optics Express, 2015, 6(6): 2237