

文章编号: 1005-5630(2025)01-0001-13

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.202411130102

结构光在生物组织中的传输研究综述

陈自禹^{1,2}, 徐双双^{1,2}, 钟诚尧^{1,2}, 郑荣坤^{1,2}, 张永涛^{1,2}

(1. 闽南师范大学 物理与信息工程学院, 福建 漳州 363000;

2. 闽南师范大学 光场调控及其系统集成应用福建省高校重点实验室, 福建 漳州 363000)

摘要: 光在生物组织中的应用受到越来越多的关注。结构光因其独特的光学特性, 在生物组织传输中具有重要的理论和应用价值。为深入研究其机制, 一方面需要建立完善的数学仿真模型来模拟传输过程, 另一方面也需要进行科学的实验来验证模拟结果。结合最新研究进展, 系统梳理和分析了结构光在生物组织中的传输特性, 为未来的相关研究提供了理论支持和实践参考。首先, 介绍了生物组织的特点和结构光的种类; 然后, 以结构光的分类为切入点, 总结了频率/波长、偏振、振幅、相位, 以及涡旋结构和相干结构等对光在生物组织中传输效应的影响, 并分析了其在生物组织传输中的最新研究进展; 最后, 指出了该领域当前研究中存在的问题和不足, 并对其发展前景和方向进行了展望。

关键词: 生物组织; 结构光场; 光传输; 相干结构

中图分类号: O 437 **文献标志码:** A

Overview of structured light transmission in biological tissues

CHEN Ziyu^{1,2}, XU Shuangshuang^{1,2}, ZHONG Chengyao^{1,2}, ZHENG Rongkun^{1,2}, ZHANG Yongtao^{1,2}

(1. College of Physics and Information Engineering, Minnan Normal University, Zhangzhou 363000, China;

2. Key Laboratory of Light Field Manipulation and System Integration Applications in Fujian Province, Minnan Normal University, Zhangzhou 363000, China)

Abstract: The application of light in biological tissues has received increasing attention. Due to their unique optical properties, structured light fields have significantly theoretical and practical values in tissue transmission. To investigate the mechanisms in detail, it is essential to establish comprehensive mathematical simulation models to mimic the transmission process, and also to conduct experiments to validate the simulation results. Combining with the latest research progress, this paper systematically reviews and analyses the transmission characteristics of structured light in biological tissues to provide theoretical support and practical reference for future research. The characteristics of biological tissues and the type of structured light are firstly introduced. Then, based on the classification of structured light as a starting point, the effects of frequency/wavelength, polarization, amplitude, phase, vortex structures, and coherent structures on

收稿日期: 2024-11-13

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(12174173); 福建省自然科学基金重点项目(2022J02047)

第一作者: 陈自禹(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为光场调控。E-mail: 1046205146@qq.com

通信作者: 张永涛(1977—), 男, 教授, 研究方向为光场调控与奇点光学。E-mail: yongtaozhangok@outlook.com

the transmission of light in biological tissues are summarized. The latest research progress in this field is analyzed. Finally, some current research deficiencies and an outlook on future developments and directions in this field are provided.

Keywords: biological tissue; structured light field; light transmission; coherent structure

引 言

自 1960 年第一台红宝石激光器问世以来, 激光因其独特的性质而迅速在各个领域得到广泛应用。近年来, 随着光学的快速发展, 激光在生物医学领域的应用变得愈加重要。科学家对生命体的探索也在日益深入, 他们通过控制激光的不同结构来观察其在生物组织中的传输特性及各种现象。因此, 生物光子学^[1]、组织光学^[2]、光生物学^[3]等光与生命科学相结合的学科也应运而生。研究光与生物组织的相互作用可以有效促进医学领域的发展, 并有助于人们理解光生物效应^[4],

这对于人们开发新的治疗方法, 理解光对生物体的影响至关重要。

在过去几年中, 有关结构光的研究得到了飞速的发展, 人们对于光的维度^[5]的理解也在不断加深。从特定的空间结构到如今的可以定制的时空结构, 这些变化使结构光在光通信^[6]、光镊^[7]、光学传感^[8]等领域都取得了突破性进展。结构光指通过特定模式在空间、时间等不同维度上进行调控后得到的光场。光子拥有高度的自由性, 包括但不限于频率/波长、偏振、振幅、相位等结构特性(如图 1 所示), 通过调控这些物理维度可以实现多种光的相关应用。对光波进行时空结

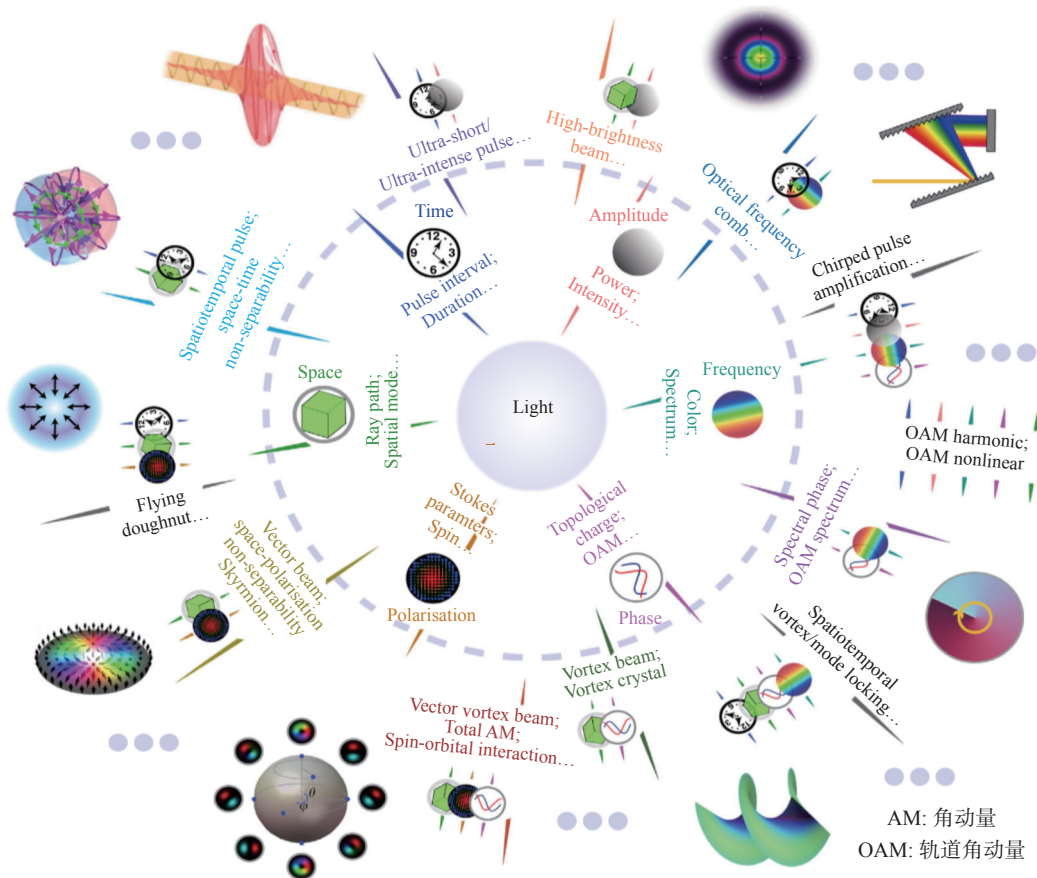


图 1 结构光的潜在自由度^[5]

Fig. 1 The potential degrees of freedom of structured light^[5]

构裁剪可以产生各种特殊光束, 如涡旋光束、拉盖尔-高斯(Laguerre Gaussian, LG)光束、贝塞尔光束等。

关于光与生物组织的相互作用, 国内外已有大量学者进行了综述, 并取得了丰富的成果。Tuchin^[9-10]总结了激光与生物组织相互作用的基本特征和原理。Khan等^[11]详细探讨了光在生物组织传输中的折射率情况, 进一步揭示了光在复杂介质中的行为规律。Cheong等^[12]和Jacques等^[13]则系统总结了生物组织中光学特性的研究进展, 为光学模型的构建提供了重要支持。此外, Gökçe等^[14]综述了生物组织湍流对光波传播的影响, 为理解光在动态生物环境中的行为提供了新的视角。在应用方面, He等^[15]探讨了偏振光在生物医学与临床领域中的重要价值。吕晨阳等^[16]总结了不同类型的生物组织光热效应模型, 为光热治疗技术的发展提供了参考。赖溥祥等^[17]重点分析了近年来光声结合技术和光学波前整形技术在生物组织操控、成像及光学计算中的应用探索。此外, 俞婷婷等^[18]从离体组织光透明方法、大组织器官标记方法、三维整体成像技术3个方面, 对整体器官的光透明成像技术进行了全面综述。

尽管以上研究为光与生物组织相互作用的理解提供了重要依据, 但从国内外文献来看, 关于结构光在生物组织中传输的系统性综述仍然较少。特别是近年来, 随着各种特殊结构光(如涡旋光束、矢量光束等)的研究逐渐成熟, 其在生物组织中的传输特性和作用机制得以更清晰地呈现。研究表明, 利用结构光的特性不仅能够揭示光与生物组织相互作用的复杂规律, 还能为医学诊断和治疗提供全新的解决方案。基于当前研究现状, 未来关于结构光与生物组织相互作用的研究可以重点关注以下几个方向: (1)生物组织对复杂光场的调制作用^[19-21]。探索生物组织对特殊结构光的散射、吸收和偏振调控机制, 并开发相应的理论模型, 这对于理解结构光在复杂生物介质中的传输规律具有重要意义。(2)结构光在生物组织中的动态行为^[22-23]。研究结构光在动态生物环境(如运动的细胞、流动的血液等)中的传输特性, 评估其在复杂生物体系中的应用潜力, 这将有助于揭示光与动态组织之间的相互作用。

(3)新型光学治疗和诊断技术的开发^[24-25]。利用结构光的高自由度特性, 探索其在精准医疗中的创新应用。例如, 基于特定光场的靶向治疗、非侵入式成像技术等, 可为临床医学提供更加高效和安全的方法。(4)人工智能与结构光的结合^[26-29]。将机器学习与光场调控技术相结合, 开发实时建模与优化方法, 实现对结构光与生物组织相互作用的精准预测与控制, 这将为复杂生物环境中的光学应用提供智能化解决方案。

深入研究结构光在生物组织中的传输机制不仅能深化人们对光与生命科学结合前沿的理解, 还能进一步推动生物医学光学技术的革新。例如, 利用结构光的特性可以优化现有的成像和治疗方案, 甚至开发出全新的光学工具, 为解决生命科学领域的重大问题提供新思路和新方法。

1 结构光在生物组织中的传输

1.1 不同频率/波长结构光在生物组织中的传输

根据波长的不同, 可将电磁波划分为多种类型。在传统光学领域中, 研究通常集中在可见光及其附近的波长范围内。然而, 随着生物光子学的快速发展, 科学家们的研究已超越可见光, 扩展到更广的波长范围, 如太赫兹(terahertz, THz)波段^[30]。这种扩展研究不仅推动了光学理论的发展, 也为生物组织中的光传输提供了新的应用场景。

在激光治疗^[31]领域, 不同波长的光在生物组织中的传输特性备受关注。例如, Barbosa等^[32]研究了不同波长低能量激光治疗(low level laser therapy, LLLT)的衰减系数。他们使用波长为660, 830和904 nm的光照射大鼠和猪的皮肤、脂肪及肌肉组织, 测量光束的衰减系数。结果显示, 随着组织厚度的增加, 光的透过率显著减小。其中, 904 nm波长的光在大鼠皮肤和猪脂肪、肌肉组织中的衰减较小, 而830 nm波长的光在猪皮肤中的衰减最小。这表明, 不同波长的光在不同生物组织中具有不同的衰减特性, 这为临床选择合适的治疗波长提供了依据。

Kaub等^[33]也对激光治疗的波长选择进行了研究。他们使用波长为905 nm和1 064 nm的激

光,分析了它们在新鲜猪皮和牛肌肉组织中的穿透深度。研究者利用超声波设备测量了组织样本的厚度,并采用两种商用激光治疗装置进行了光传输实验。结果显示,1 064 nm 波长的激光在穿透组织上部 10 mm 厚度时表现较好,但在深层组织中,光束的脉冲模式和峰值模式对传输效果的影响更为显著。这些研究为激光治疗装置的设计优化提供了有价值的技术支持。近年来,激光治疗的应用已广泛扩展至多个领域,如脱发治疗^[34]、放射性骨坏死治疗^[35]、伤口愈合^[36]等,这说明激光治疗在临床实践中具有一定的优势和潜力。除了激光治疗,不同波长的光在生物检测中的应用也有重要的研究价值。例如,Feng 等^[37]利用 1 300~1 800 nm 的多波长光声技术测量骨胶原蛋白含量,评估骨骼健康状态。这种基于光谱特性的检测方法为疾病诊断和生物组织分析提供了新的手段。此外,利用人工智能,研究人员能够更加精确地选择光的波长,从而实现更为准确的医学成像^[28]。

在神经科学领域,光学神经调控技术^[38]近年来取得了显著进展。传统的光遗传学技术^[39-40]虽然具有高时空分辨率和细胞类型特异性,但由于脑组织对光的散射和吸收能力较强,其在深脑区域的应用受到限制,通常需要依赖光纤的插入。这种操作会带来组织损伤、炎症和感染的风险,从而影响实验设计的灵活性和结果的准确性。为解决这一问题,研究人员将相关研究重点逐渐转向长波长的光。

长波长的光(如近红外光)具有更强的组织穿透力和更低的光毒性,因此成为了光神经调控的重要研究对象^[41]。此外,光的次级效应(如光热、光声和光电化学效应)也被用于神经调控^[42-44]。例如,结合纳米材料的光转导器可以实现更高的时空分辨率,同时最大程度地减少组织损伤。这种技术的进步为深脑区域的非侵入式光学神经调控提供了新的可能性。在波长范围的拓展中,有关 THz 波段的研究也逐渐受到大家的关注。太赫兹光谱技术结合太赫兹成像技术^[45],为生物组织分析和疾病诊断提供了全新的工具。Zhang 等^[46]对太赫兹生物技术在神经科学领域的发展进行了系统总结,并探讨了其潜在应用。Martins 等^[47]综述了从深紫外到太赫兹波段的宽光谱范围内,

生物组织光学特性的测量方法和结构研究进展,为广波段光学技术在生物医学中的应用奠定了基础。此外,Cherkasova 等^[48]展示了近年来有关太赫兹波细胞生物效应的研究成果。这些研究表明,太赫兹波具有独特的非侵入式检测能力。但当前人们对太赫兹辐射的生物安全限值的了解较为有限,其临床应用仍面临挑战。

从可见光到近红外光,再到太赫兹波段,不同波长结构光在生物组织中的传输研究不断推动着生物光子学的发展。这些研究不仅拓展了光学技术的应用边界,也为医学诊断、激光治疗、光学神经调控等领域提供了新的解决方案。未来,随着光学技术的不断进步,长波长的光和太赫兹波的应用有望突破现有技术瓶颈,为生物医学研究带来更多创新和突破。

1.2 不同偏振结构光在生物组织中的传输

偏振光在结构光研究中的重要性不容忽视。与随机振动的非偏振光相比,偏振光在穿透生物组织时表现出独特的散射和吸收现象^[49-52]。这些现象不仅为理解生物组织的光学特性提供了全新的理论视角,也为医疗成像和疾病诊断开辟了新的技术路径。研究偏振光在生物组织中的传输规律,既有助于提升成像质量,又为新型光生物学技术^[53]的发展奠定了理论基础。在早期研究中,Sankaran 等^[49-50]设计了一套偏振光测量系统,利用 He-Ne 激光器、光弹调制器、偏振片、波片、光电探测器和锁相放大器等设备,测量了不同偏振状态下的光强度。他们重点分析了线偏振光和圆偏振光在猪组织样本和采用不同大小的聚苯乙烯微球悬浮液模拟的生物组织样本中的散射和去偏振效应。研究结果表明,在生物组织中线偏振光比圆偏振光更容易去极化(即偏振状态变得不再特定)。这说明生物组织对不同偏振光的作用机制存在显著差异。

近年来,针对偏振光的去偏振效应,Meglinski 等^[54]进一步开展了相关研究。他们深入探讨了偏振光在复杂生物组织环境中的传输规律,并提供了关键的实验数据支持。Lopushenko 等^[55]关注了圆偏振光在浑浊类组织内部的去偏振现象,发现多次散射会导致圆偏振光的偏振退化。然而,他们的研究同时表明,在无序介质中,由于

优先散射的相互作用, 圆偏振光仍然能够表现出一定程度的偏振记忆效应。这种现象与散射过程中自旋角动量守恒密切相关, 为理解偏振光在复杂介质中的行为提供了新的物理视角。

有关偏振光的研究并不局限于理论分析和数值模拟, 其在生物组织微观结构表征中的应用研究也日益增多。例如, Mueller 矩阵已经成为表征生物组织微观结构特征的重要工具, 它对组织微观结构的变化高度敏感, 能显著提高成像的质量和对比度。同样, 在微观结构分析领域, Song 等^[56]开发了一种连续 Stokes 成像系统。该系统能够以秒级刷新率快速跟踪组织在光学透明化过程中微观结构的变化。这一高效成像技术为实时观测生物组织动态变化提供了重要手段。此外, Pardo 等^[57]使用 Mueller 矩阵成像系统研究了皮肤、骨骼肌、结缔组织和脂肪的偏振特性。Chen 等^[58]开发了 Mueller 矩阵偏振成像系统, 揭示了生物组织偏振特性的机械稳定性。该研究对病理结构的精确诊断具有重要意义。

在实际应用中, 偏振光技术也被广泛用于生物组织病理变化的研究。例如, Stoilova 等^[59]利用 Zeta-20 偏光显微镜和 635 nm 半导体泵浦固体激光器, 研究了人肺组织标本中病变(如黑肺病、肺结核、流感性肺炎、肺梗塞及恶性肿瘤)组织的偏振特性(如图 2 所示)。通过测量光束的基本偏振参数(如方位角、椭圆率角、偏振度和照明功率), 他们分析了光在与生物组织相互作用后的偏振状态的变化。这些研究不仅揭示了病变组织的光学特性, 还为疾病的快速检测和诊断提供了新的光学手段。此外, 偏振光在生物组织中的传输机制还涉及其与生物组织之间复杂的相互作用。Tuchin^[60]系统总结了生物组织偏振各向异性的内在根源, 并结合理论和实验深入探讨了偏振光与生物组织的相互作用机制。他对随机和准有序组织中的单次散射与多次散射的特征进行了分析, 揭示了偏振光在复杂介质中的主要交互特性。这些研究不仅有助于深化人们对偏振光传输规律的理解, 还为基于偏振光的成像和诊断技术提供了重要的理论支撑。

有关偏振光在生物组织中的传输的研究加深了人们对生物组织光学特性的理解, 并为医疗成像和疾病诊断提供了重要技术支持。这类研究从

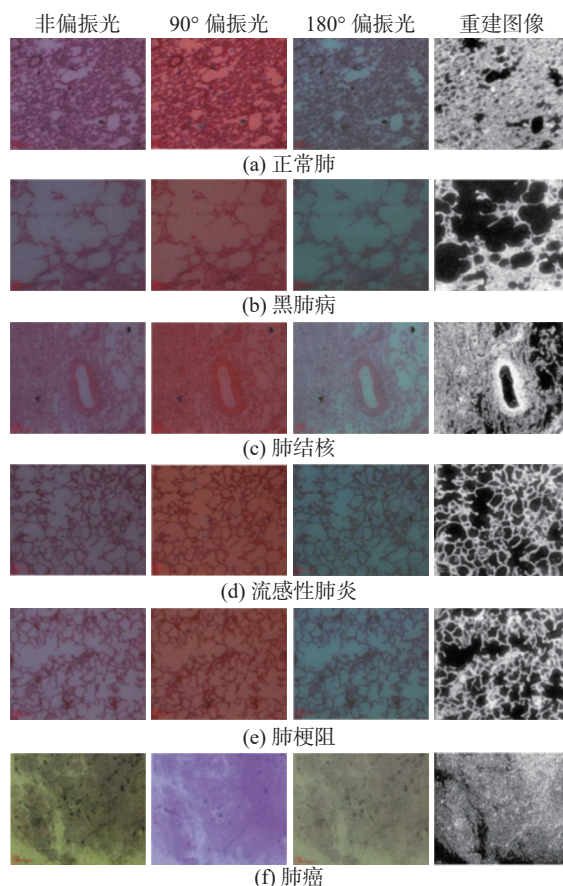


图 2 不同光透射人类不同肺组织样本的图像^[59]

Fig. 2 Transmission of different light through various human lung tissue samples^[59]

对散射和去偏振效应的探索, 到在微观结构表征与医学诊断、遥感监测等领域的实践应用, 都展现出不断拓展的技术潜力。

1.3 不同复振幅结构光在生物组织中的传输

振幅与相位调控对光在生物组织中的传输研究具有重要意义。生物组织的强散射特性是限制光学成像深度的主要原因。特别是表层结构的散射效应会显著削弱成像的质量。为克服这些困难, 波前整形技术应运而生。Vellekoop 等^[61]于 2007 年首次引入了这一技术。其核心原理是利用入射波与发射波之间的确定性关系, 通过调控入射波的相位或振幅来补偿散射介质引起的失真, 从而实现目标位置的光聚焦。在这个过程中, 空间光调制器^[62]成为最常用的工具。近年来, Wu 等^[63]提出了一种基于数字微镜器件的新型光学仪器。它具有高刷新率和多调整模式的特

点, 在生物组织成像中展现出显著优势。同期, Li 等^[64]对波前整形技术的最新进展进行了系统性总结, 为该领域的研究提供了新的见解。

在早期研究中, Chance 等^[65]利用散射和吸收测量技术, 深入探讨了人体组织的光学特性。他们提出, 通过测量光的振幅和相位, 可以计算出人体组织的吸收系数和散射系数, 进而揭示生物组织的光学本质。这些研究为波前整形技术奠定了理论基础, 并为其在复杂生物组织中的应用提供了重要支持。近年来, May 等^[66]开发了一种快速收敛的动态自适应散射补偿全息术, 并将其应用于高度散射的小鼠海马组织的双光子荧光成像, 成像深度达到 530 μm 。这一方法不仅显著提升了散射补偿的效果, 还为非侵入性成像的研究提供了新的方向。

此外, 人工智能 (artificial intelligence, AI) 的引入进一步推动了复杂光学成像技术的发展。Park 等^[67]通过实验展示了 AI 在定量相位成像 (quantitative phase imaging, QPI) 中的广泛应用, 包括图像重建、增强、分割、分类和跨模态转换 (如图 3 所示)。例如, 深度学习方法在去除 QPI 图像中的像差、斑点和相干噪声等方面取得了卓越的成效, 同时在细胞和病原体的分类中也表现出良好的准确性。AI 与 QPI 的协同组合显著提升了生物成像的性能, 减少了数据处理的时间和成本, 拓宽了 QPI 在生命科学中的应用范围。这种数据驱动的方法为未来生命科学领域的成像研究提供了重要支持。

除了散射补偿与 AI 技术的应用, 研究者在相位与振幅相互作用的探索上也获得了重要进展。Telenkov 等^[68]构建了基于频率域光热成像的非侵入性成像系统。该系统利用相干锁相放大技术, 结合参考信号与检测信号的特定频率成分, 实现了对生物组织深度的高精度振幅与相位成像。这种技术解决了传统光声成像的成像深度有限的问题, 为非侵入性诊断开辟了新路径。另一方面, Zaitsev 等^[69]在光学相干弹性成像 (optical coherence elastography, OCE) 中优化了相位梯度测量方法, 并结合模拟与实验提出了降低噪声影响的新策略, 从而提高了应变图的精度。这一方法为高分辨率生物组织成像提供了更为可靠的技术手段。

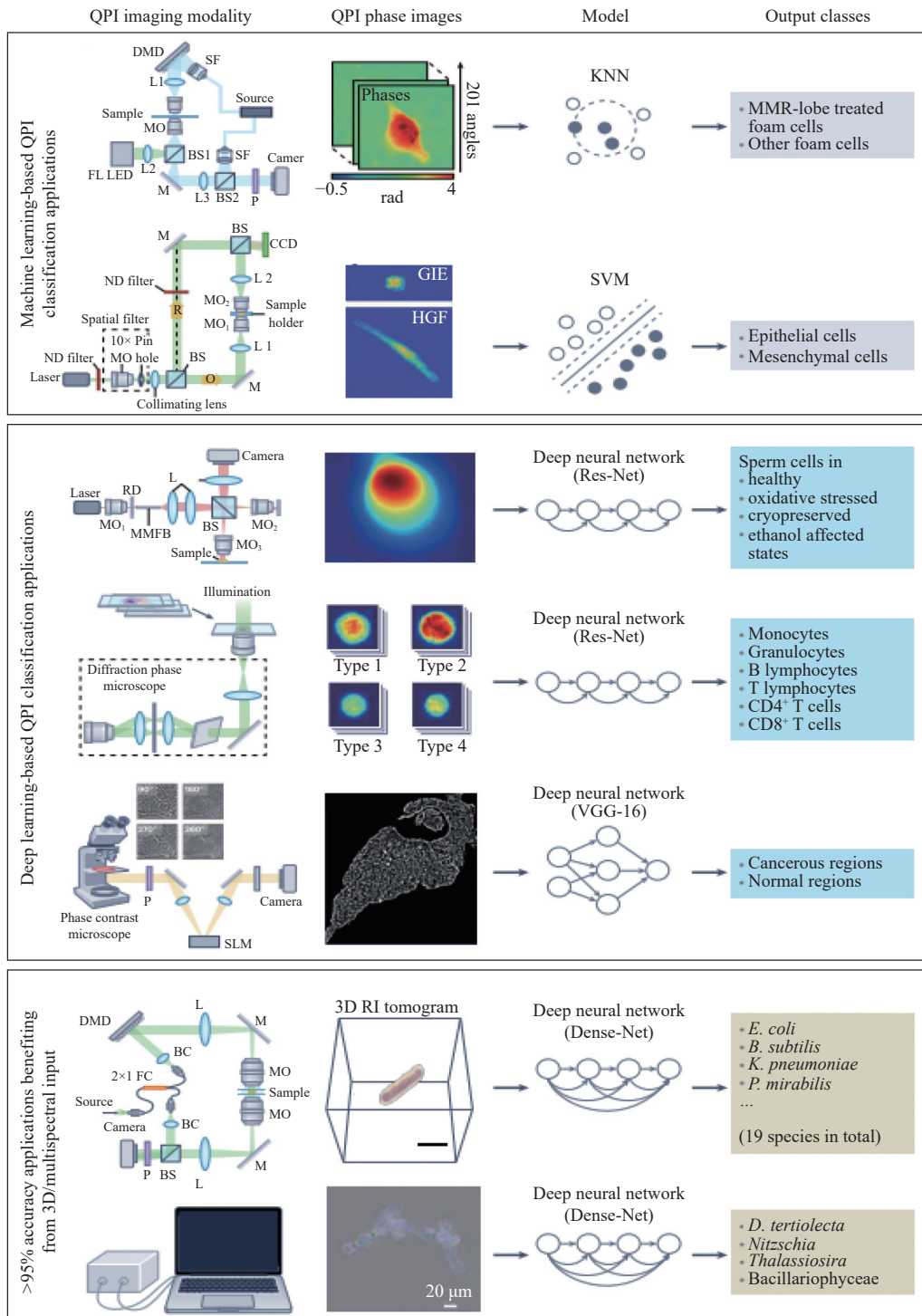
当前, 有关不同复振幅分布的光在生物组织中传输的研究在不断深入, 并展现出巨大的应用潜力。通过精确调控光的振幅与相位特性, 研究者能够有效提高光在复杂生物介质中的传播能力, 从而提升成像质量与治疗效果。波前整形技术、AI 算法和相位-振幅测量方法的持续进步不仅为基础科学研究提供了新工具, 也为临床医学带来了新的可能性。

1.4 不同涡旋结构光在生物组织中的传输

携带轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM) 的涡旋光束在粒子捕获、成像、医学诊断、微机械、自旋电子学和量子信息等领域有着广泛应用。在过去 20 年中, 研究者们深入研究了涡旋光束在自由空间和介质中的传播特性, 并揭示了其相位奇异性和光学涡旋的特征^[70-73], 这些研究为理解涡旋光束的独特性质奠定了基础。

与普通光束相比, 涡旋光束在生物组织中的传输表现出独特优势。Liu 等^[74]研究发现, 生物组织会对涡旋光束的部分性质产生影响。随着传输距离的增加, 涡旋光束的暗空心特征会逐渐减弱, 涡旋光束逐渐演化为类高斯光束, 这一变化对其在生物成像和诊断中的应用具有重要意义。Wang 等^[75]使用空间光调制器生成不同 OAM 值的 LG 涡旋光束, 研究其在散射微珠和脑组织中的传输特性。结果显示: 在弹道区, 含 OAM 和不含 OAM 的光束的透过率无显著差异; 而在扩散区, OAM 值越高, 光束透过率越大, 这表明涡旋光束具有更强的穿透能力。

近年来, 研究者进一步探讨了不同涡旋光束在生物组织中的传输规律及潜在应用。Biton 等^[76]以新鲜鸡胸肉为实验介质, 研究了不同阶数 LG 光束的透过率。他们发现随着光束拓扑荷数的增加, 其在生物组织中的衰减系数逐渐减小, 穿透性显著增强。Li 等^[77]探讨了涡旋光束的结构对其在生物组织中传输能力的影响。Fu 等^[78]讨论了 OAM 对涡旋光束穿透深度的影响。Meglinski 等^[79]使用 LG 光束对正常和癌变组织样本进行实验, 发现 LG 光束的 OAM 在 2 种组织中均得以保持, 并产生了显著的相移。此外, LG 光束对组织折射率变化的敏感性比普通光束高约 1000 倍, 从而显示出其在疾病诊断中的应用潜力。Mamuti



QPI: 定量相位成像; FL LED: 荧光 LED 光源; DMD: 数字微镜器件; L: 透镜; SF: 空间滤波器; BS: 分束器; M: 反射镜; P: 偏振片; KNN: K 近邻算法; MMR: 罗格列酮; ND filter: 中性密度滤光片; MO: 显微镜物镜; MO hole: 显微镜物镜孔; CCD: CCD 相机; SVM: 支持向量机; RD: 旋转盘; MMFB: 多模光纤束; SLM: 空间光调制器; FC: 光纤耦合器; BC: 光束准直器; GIE: 永生人牙髓角质形成细胞; HGF: 永生人牙髓成纤维细胞; 3D RI tomogram: 三维折射率断层成像; Res-Net: 残差神经网络; VGG-16: 深度卷积神经网络; Dense-Net: 密集连接卷积神经网络

图 3 QPI 和 AI 在生命科学中的各种分类应用^[67]

Fig. 3 Applications in life science using QPI and AI^[67]

等^[80]进一步研究了涡旋光束在类似生物组织的随机散射介质中的 OAM 保持特性, 验证了 OAM 在散射传输中的记忆效应。

Mamani 等^[81]探讨了不同氧含量下小脑组织对极化多极激光束 OAM 传输的影响。他们研究了正常氧状态 [氧体积分数 $\varphi(\text{O}_2) = 21\%$] 和缺氧状态 [$\varphi(\text{O}_2) = 7\%$] 下小脑组织对不同极化和不同 OAM 值光束的传输特性。实验发现, 光态 (OAM 和极化) 与脑组织的氧含量会共同影响光束的传输效率。光束在控制组 (正常氧状态) 的小脑组织中的透过率高于缺氧组, 并表现出区域性的多极矩相互作用。初步结果表明, OAM 光束在小脑组织中的传输受到组织拓扑结构和氧含量的显著影响, 这为进一步研究涡旋光束在活体组织中的应用提供了方向。

Khanom 等^[82]对携带 OAM 的 LG 光束在复杂散射介质中的传播进行了系统研究。他们利用改进的马赫-曾德尔干涉仪以及蒙特卡洛 (Monte Carlo, MC) 模拟方法, 分析了不同散射介质中 LG 光束的强度和相位分布。研究表明: 在低散射介质中, LG 光束能够较好地保持 OAM 和相位相干性; 而在多散射介质中, LG 光束虽然部分特性受到影响, 但仍保留一定的 OAM 记忆效应。这说明, 涡旋光束在复杂介质中的独特传输特性可为光学通信和遥感等领域提供技术支持。

除光学特性外, 涡旋光束对生物样本的作用也受到了关注。He 等^[83]探讨了不同 OAM 光束对小球藻生长情况的影响。他们测试了不同角动量光束在小球藻液中的透过率, 并进一步研究了这些光源对细胞密度、叶绿素含量及生物大分子合成的影响。结果表明, 右旋光和携带 OAM 的光束在透过率上具有优势, 且 OAM 光束显著促进了蛋白质合成。这些发现为光生物技术的开发提供了新思路。

涡旋光束在生物组织中的传输特性及其广泛应用前景为结构光的研究开辟了新领域。从穿透深度的提升到对生物组织的高灵敏度响应, 涡旋光束展现出巨大的潜能。

1.5 不同空间相干结构光在生物组织中的传输

空间相干结构光与生物组织的相互作用一直是光学领域的研究热点。通过精确调控光的时空

相干性, 研究者能够获得多种独特的相干光束。这些光束在生物成像、光学操控和信息传递等方面具有重要的应用价值。相干光场的研究不仅推动了光学理论的发展, 还为复杂生物介质中的光传输提供了新的技术路径和应用前景。

在相关研究中, Duan 等^[84]探讨了空间相干长度对高斯-谢尔模型 (Gaussian Schell model, GSM) 涡旋光束在湍流生物组织中光谱偏移的影响。结果显示, 光束的空间相干性能够加速光谱变化并减慢光谱跳跃。进一步研究表明, 不同类型的部分相干光束, 例如不携带涡旋位相和携带涡旋位相的随机电磁 GSM 光束^[85-86]以及部分相干圆刃型位错光束^[87-88]等在生物组织中的传输存在显著差异。这些研究为解析部分相干光在生物组织中的传输特性奠定了重要基础。

Wu 等^[89]对比了 3 种具有不同相干结构的部分相干光束, 具体包括 GSM、拉盖尔-高斯谢尔模型 (Laguerre Gaussian Schell model, LGSM) 和贝塞尔-高斯谢尔模型 (Bessel Gaussian Schell model, BGSM) 光束在生物组织湍流中的传输特性。研究表明, GSM 光束在组织湍流中的变化相对较小, 表现出更好的稳定性。Ni 等^[90]研究了部分相干圆平顶高斯涡旋光束在组织中的传输特性, 分析了各参数对平均强度和偏振度分布的影响, 并探讨了其在医学成像和诊断中的潜在应用价值。而 Zhang 等^[91]进一步研究了厄米高斯相关谢尔模型 (Hermite Gaussian correlated Schell model, HGCSM) 光束在组织湍流中的平均强度分布和光束质量, 发现其对组织湍流的敏感性低于 GSM 光束, 并且在传输过程中不会表现出自分裂特性。Chib 等^[92]研究了部分相干广义平顶双曲余弦厄米高斯光束的传输行为, 结果显示, 光束在生物组织中的轮廓逐渐趋向高斯分布, 但在不同组织中表现出不同的稳定性。在大鼠肝组织中, 光束能够更长时间地保持甜甜圈形状, 而在小鼠肝组织中光束受湍流影响更大。

光学相干显微镜技术作为一种基于相干光学的高分辨率成像工具, 在生物组织研究中发挥着重要作用。Min 等^[93]将光学相干显微镜与连续切片技术相结合, 构建了连续光学相干显微镜 (serial optical coherence microscopy, SOCM) 系统, 用于小鼠脑和肾组织的成像研究。他们选取

脑成像模型和肾疾病模型, 通过 SOCM 系统获取高分辨率和宽视野的三维成像数据, 并利用多种图像处理算法对组织内部结构进行定量分析, 如脑组织的立体特征分析和肾血管体积变化的测量。与核磁共振成像和传统组织学显微镜成像相比, SOCM 技术能够在不需要标记或造影剂的前提下使天然 3D 结构可视化, 并能精确测定区域的体积。这一技术不仅在脑和肾组织的研究中展现出优势, 在其他器官的研究中也具有一定的潜力, 特别是在与其他光学技术结合后, 其应用边界能得到进一步拓展。

由于生物组织折射率的波动, 传统光束在组织中的传输距离通常较短, 且在传播过程中光场的相干性和强度会迅速发生变化^[13]。与传统光束相比, 相干光束在湍流条件下表现出更好的抗扰动能力。例如, 广义平顶光束和厄米高斯光束在复杂介质中的稳定性和传输效率均优于传统光束。因此, 相干与部分相干光束或许能成为应对生物组织散射和湍流影响的有效工具, 为改善激光在组织中的信息传递和能量分布提供新思路。

随着相干光束技术和光学相干显微镜的不断发展, 研究者能够更深入地探讨生物组织中的光学传输规律。这些技术不仅在基础光学研究中扮演着重要角色, 还为生物医学的成像与诊断提供了全新的手段。

2 结论与展望

结构光具有高自由度和可调控性, 为光与生物组织相互作用的研究提供了全新的视角。从频率/波长、偏振、复振幅到相干性和时空结构的调控, 结构光的多维特性为生物光子学、组织光学和光生物学等学科的研究注入了新的动力。本文系统梳理了结构光在生物组织中的传输效应及其应用潜力, 归纳了不同类型光的传输特性和其在复杂组织环境中的行为规律, 结合国内外研究成果讨论了相关领域的研究方向及存在的问题。

近年来, 关于光与生物组织相互作用的研究已取得了重要进展, 例如: 不同频率/波长结构光的研究揭示了不同波长光在组织中的吸收、散射及透射规律, 为激光治疗、光学成像和光学神经调控等技术提供了理论依据; 不同振幅、相位

结构光在医学成像方面表现出独特优势; 偏振光及其调控特性在组织诊断和病变识别中具有重要应用价值; 部分相干光束、涡旋光束等结构光在组织传输中表现出良好的稳定性和抗扰动能力, 为研究复杂介质中的光学传输特性提供了有力支持。虽然科学家在相关研究中已取得显著成果, 但结构光在生物组织中的传输机制仍存在诸多未解决的问题, 如结构光在复杂异质性组织中的动态行为, 多层散射环境下光场的演化规律等。生物组织的复杂性和异质性会导致光传输过程中的散射和吸收效应难以被精确预测。尽管 Kolmogorov 湍流模型^[94]等已成为相关研究的基础工具, 但现有数学模型和模拟方法仍难以全面描述组织的多尺度结构和动态散射行为, 从而可能导致光场特性表征与实际情况之间存在偏差。与模拟研究相比, 基于真实生物组织的实验研究相对较少, 且实验设计往往在高度理想化或简化条件下进行, 难以全面反映真实生物环境中的复杂动态变化。例如, 不同组织类型对光场的响应差异较大^[13, 95], 但现有研究尚缺乏对多种生物组织及其动态特性的系统性分析。如何在动态环境中实现结构光的高效传输和精确调控, 仍是未来研究中的关键性难题。针对这些不足, 未来的研究可以聚焦于改进生物组织光学模型, 提升实验研究的真实性与多样性, 探索结构光在动态环境中的应用, 推动人工智能与光学技术的融合, 以及进行多学科合作等。

参考文献:

- [1] 刘颂豪, 孟耀勇, 刘承宜. 生物光子学及其应用 [J]. 激光与红外, 1996, 26(1): 7-9.
- [2] 谢树森, 李晖, 陆祖康. 组织光学概要 [J]. 物理, 1998, 27(10): 599-604.
- [3] 沈恂. 中国光生物学研究的历史回顾 [J]. 生物物理学报, 2010, 26(11): 942-949.
- [4] 翁季, 陈仲林, 胡英奎, 等. 光生物效应研究综述 [J]. 灯与照明, 2007, 31(1): 1-3.
- [5] HE C, SHEM Y J, FORBES A. Towards higher-dimensional structured light[J]. Light: Science & Applications, 2022, 11(1): 205.
- [6] AGRAWAL G P. Optical communication: its history and recent progress[M]//AI-AMRI M D, EL-GOMATI

- M, ZUBAIRY M S. Optics in Our Time. Cham: Springer, 2016: 177 – 199.
- [7] MOFFITT J R, CHEMLA Y R, SMITH S B, et al. Recent advances in optical tweezers[J]. *Annual Review of Biochemistry*, 2008, 77: 205 – 228.
- [8] KUSWANDI B, NURIMAN N, HUSKENS J, et al. Optical sensing systems for microfluidic devices: a review[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2007, 601(2): 141 – 155.
- [9] TUCHIN V V. Light interaction with biological tissues: overview[C]//Proceedings Volume 1884, Static and Dynamic Light Scattering in Medicine and Biology. Los Angeles: SPIE, 1993, 1884: 234 – 272.
- [10] TUCHIN V V. Tissue optics and photonics: biological tissue structures[J]. *Journal of Biomedical Photonics & Engineering*, 2015, 1(1): 3 – 21.
- [11] KHAN R, GUL B, KHAN S, et al. Refractive index of biological tissues: review, measurement techniques, and applications[J]. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, 2021, 33: 102192.
- [12] CHEONG W F, PRAHL S A, WELCH A J. A review of the optical properties of biological tissues[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1990, 26(12): 2166 – 2185.
- [13] JACQUES S L. Optical properties of biological tissues: a review[J]. *Physics in Medicine & Biology*, 2013, 58(11): R37 – R61.
- [14] GÖKÇE M C, ATA Y, BAYKAL Y. Tissue turbulence and its effects on optical waves: a review[J]. *Optics Communications*, 2023, 546: 129816.
- [15] HE C, HE H H, CHANG J T, et al. Polarisation optics for biomedical and clinical applications: a review[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 194.
- [16] 吕晨阳, 战仁军. 激光-生物组织光热效应模型综述 [J]. *激光杂志*, 2021, 42(1): 17 – 24.
- [17] 赖溥祥, 赵麒, 周颖颖, 等. 深层生物组织光学技术发展及其应用(特邀)[J]. *中国激光*, 2024, 51(1): 0107003.
- [18] 俞婷婷, 朱苒. 整体器官的光透明成像方法综述 [J]. *中国激光*, 2020, 47(2): 0207007.
- [19] 谢家俊, 唐诗瑶, 陈永强, 等. 贝塞尔光束在生物组织中的重建特性研究 [J]. *中国激光*, 2022, 49(5): 0507302.
- [20] 杜娇, 段美玲, 张秀清, 等. 部分相干光束在生物组织中的传输行为 [J]. *光电子·激光*, 2022, 33(9): 1001 – 1008.
- [21] 王喜昌. 光在多层半无限厚生物组织中传输的 P3 方程 [J]. *光学学报*, 2024, 44(11): 1117001.
- [22] OU Z H, DUH Y S, ROMMELFANGER N J, et al. Achieving optical transparency in live animals with absorbing molecules[J]. *Science*, 2024, 385(6713): eadm6869.
- [23] ZHANG Z K, BAI L, CONG L, et al. Imaging volumetric dynamics at high speed in mouse and zebrafish brain with confocal light field microscopy[J]. *Nature Biotechnology*, 2021, 39(1): 74 – 83.
- [24] HU X T, ZHOU L, WU X, et al. Review on near-field detection technology in the biomedical field[J]. *Advanced Photonics Nexus*, 2023, 2(4): 044002.
- [25] LI Y J, ZHANG S X, WU L H, et al. Polarization microwave-induced thermoacoustic imaging for quantitative characterization of deep biological tissue microstructures[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(5): 1297 – 1306.
- [26] ARABI H, ZAIDI H. Applications of artificial intelligence and deep learning in molecular imaging and radiotherapy[J]. *European Journal of Hybrid Imaging*, 2020, 4(1): 17.
- [27] KANG I, ZHANG Q R, YU S X, et al. Coordinate-based neural representations for computational adaptive optics in widefield microscopy[J]. *Nature Machine Intelligence*, 2024, 6(6): 714 – 725.
- [28] PANAYIDES A S, AMINI A, FILIPOVIC N D, et al. AI in medical imaging informatics: current challenges and future directions[J]. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 2020, 24(7): 1837 – 1857.
- [29] SARABI M R, JIANG N, OZTURK E, et al. Biomedical optical fibers[J]. *Lab on a Chip*, 2021, 21(4): 627 – 640.
- [30] SALIKHOV R, ILYAKOV I, KÖRBER L, et al. Coupling of terahertz light with nanometre-wavelength magnon modes via spin-orbit torque[J]. *Nature Physics*, 2023, 19(4): 529 – 535.
- [31] CHANG C J, HSIAO Y C, HANG N L T, et al. Biophotonic effects of low-level laser therapy on adipose-derived stem cells for soft tissue deficiency[J]. *Annals of Plastic Surgery*, 2023, 90(5S): S158 – S164.
- [32] BARBOSA R I, DE OLIVEIRA GUIRRO E C, BACHMANN L, et al. Analysis of low-level laser transmission at wavelengths 660, 830 and 904 nm in biological tissue samples[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2020, 209: 111914.
- [33] KAUB L, SCHMITZ C. Comparison of the penetration depth of 905 nm and 1064 nm laser light in surface layers of biological tissue ex vivo[J]. *Biomedicine*,

- 2023, 11(5): 1355.
- [34] GENTILE P, GARCOVICH S. The effectiveness of low-level light/laser therapy on hair loss[J]. *Facial Plastic Surgery & Aesthetic Medicine*, 2024, 26(2): 228 – 235.
- [35] DI CARVALHO MELO L, SILVEIRA B B, MONTEIRO M M, et al. Current trends and available evidence on low-level laser therapy for osteoradionecrosis: a scoping review[J]. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, 2024, 50: 104381.
- [36] MATHIOUDAKI E, RALLIS M, POLITOPOULOS K, et al. Photobiomodulation and wound healing: low-level laser therapy at 661 nm in a scratch assay keratinocyte model[J]. *Annals of Biomedical Engineering*, 2024, 52(2): 376 – 385.
- [37] FENG T, GE Y X, XIE Y J, et al. Detection of collagen by multi-wavelength photoacoustic analysis as a biomarker for bone health assessment[J]. *Photoacoustics*, 2021, 24: 100296.
- [38] SUN C, FAN Q, XIE R G, et al. Tetherless optical neuromodulation: wavelength from orange-red to mid-infrared[J]. *Neuroscience Bulletin*, 2024, 40(8): 1173 – 1188.
- [39] FENNO L, YIZHAR O, DEISSEROTH K. The development and application of optogenetics[J]. *Annual Review of Neuroscience*, 2011, 34: 389 – 412.
- [40] CHEN R, GORE F, NGUYEN Q A, et al. Deep brain optogenetics without intracranial surgery[J]. *Nature Biotechnology*, 2021, 39(2): 161 – 164.
- [41] CHEN Y, WANG S F, ZHANG F. Near-infrared luminescence high-contrast *in vivo* biomedical imaging[J]. *Nature Reviews Bioengineering*, 2023, 1(1): 60 – 78.
- [42] JIANG Y, HUANG Y M, LUO X Y, et al. Neural stimulation *in vitro* and *in vivo* by photoacoustic nanotransducers[J]. *Matter*, 2021, 4(2): 654 – 674.
- [43] WU X, YANG F, CAI S, et al. Nanotransducer-enabled deep-brain neuromodulation with NIR-II light[J]. *ACS Nano*, 2023, 17(9): 7941 – 7952.
- [44] JIANG S, WU X, ROMMELFANGER N J, et al. Shedding light on neurons: optical approaches for neuromodulation[J]. *National Science Review*, 2022, 9(10): nwac007.
- [45] PENG Y, SHI C J, WU X, et al. Terahertz imaging and spectroscopy in cancer diagnostics: a technical review[J]. *BME Frontiers*, 2020, 2020: 2547609.
- [46] ZHANG J, LI S, LE W D. Advances of terahertz technology in neuroscience: current status and a future perspective[J]. *iScience*, 2021, 24(12): 103548.
- [47] MARTINS I S, SILVA H F, LAZAREVA E N, et al. Measurement of tissue optical properties in a wide spectral range: a review [Invited][J]. *Biomedical Optics Express*, 2022, 14(1): 249 – 298.
- [48] CHERKASOVA O P, SERDYUKOV D S, NEMOVA E F, et al. Cellular effects of terahertz waves[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2021, 26(9): 090902.
- [49] SANKARAN V, EVERETT M J, MAITLAND D J, et al. Comparison of polarized-light propagation in biological tissue and phantoms[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(15): 1044 – 1046.
- [50] SANKARAN V, WALSH JR J T, MAITLAND D J. Comparative study of polarized light propagation in biologic tissues[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2002, 7(3): 300 – 306.
- [51] JACQUES S L. Tutorial on Monte Carlo simulation of photon transport in biological tissues [Invited][J]. *Biomedical Optics Express*, 2023, 14(2): 559 – 576.
- [52] JACQUES S L, LEE K, RAMELLA-ROMAN J C. Scattering of polarized light by biological tissues[C]//Proceedings Volume 4001, Saratov Fall Meeting'99: Optical Technologies in Biophysics and Medicine. Saratov: SPIE, 2000: 14 – 28.
- [53] LEISTER D. Photobiology: introduction, overview and challenges[J]. *Frontiers in Photobiology*, 2023, 1: 1253330.
- [54] MEGLINSKI I, TRIFONYUK L, BACHINSKY V, et al. Shedding the polarized light on biological tissues[M]. Singapore: Springer, 2021.
- [55] LOPUSHENKO I, BYKOV A, MEGLINSKI I. Depolarization composition of backscattered circularly polarized light[J]. *Physical Review A*, 2023, 108(4): L041502.
- [56] SONG J W, ZENG N, GUO W, et al. Stokes polarization imaging applied for monitoring dynamic tissue optical clearing[J]. *Biomedical Optics Express*, 2021, 12(8): 4821 – 4836.
- [57] PARDO I, BIAN S B, GOMIS-BRESCÓ J, et al. Wide-field Mueller matrix polarimetry for spectral characterization of basic biological tissues: muscle, fat, connective tissue, and skin[J]. *Journal of Biophotonics*, 2024, 17(1): e202300252.
- [58] CHEN Y T, CHU J K, XIN B D, et al. Mechanical stability of polarization signatures in biological tissue characterization[J]. *Biomedical Optics Express*, 2024,

- 15(4): 2652 – 2665.
- [59] STOILOVA A, NAZAROVA D, BLAGOEVA B, et al. Polarized light for detection of pathological changes within biological tissues[C]//Nanoscience and Nanotechnology in Security and Protection against CBRN Threats. Dordrecht: Springer, 2020: 477 – 483.
- [60] TUCHIN V V. Polarized light interaction with tissues[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2016, 21(7): 071114.
- [61] VELLEKOOP I M, MOSK A P. Phase control algorithms for focusing light through turbid media[J]. *Optics Communications*, 2008, 281(11): 3071 – 3080.
- [62] CASASENT D. Spatial light modulators[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1977, 65(1): 143 – 157.
- [63] WU J H, FENG T, CHEN Q, et al. Photoacoustic guided wavefront shaping using digital micromirror devices[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 174: 110570.
- [64] LI H H, YU Z P, ZHONG T T, et al. Performance enhancement in wavefront shaping of multiply scattered light: a review[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2024, 29(S1): S11512.
- [65] CHANCE B, COPE M, GRATTON E, et al. Phase measurement of light absorption and scatter in human tissue[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1998, 69(10): 3457 – 3481.
- [66] MAY M A, BARRÉ N, KUMMER K K, et al. Fast holographic scattering compensation for deep tissue biological imaging[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 4340.
- [67] PARK J, BAI B J, RYU D, et al. Artificial intelligence-enabled quantitative phase imaging methods for life sciences[J]. *Nature Methods*, 2023, 20(11): 1645 – 1660.
- [68] TELENKOV S A, MANDELIS A. Fourier-domain biophotocoustic subsurface depth selective amplitude and phase imaging of turbid phantoms and biological tissue[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2006, 11(4): 044006.
- [69] ZAITSEV V Y, MATVEYEV A L, MATVEEV L A, et al. Optimized phase gradient measurements and phase-amplitude interplay in optical coherence elastography[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2016, 21(11): 116005.
- [70] SZTUL H. Optical vortices: angular momentum of light, energy propagation, and imaging[D]. New York: City University of New York, 2008.
- [71] VAITY P, RUSCH L. Perfect vortex beam: Fourier transformation of a Bessel beam[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(4): 597 – 600.
- [72] LLOYD S M, BABIKER M E, THIRUNAVUKKARASU G, et al. Electron vortices: beams with orbital angular momentum[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2017, 89(3): 035004.
- [73] LUSKI A, SEGEV Y, DAVID R, et al. Vortex beams of atoms and molecules[J]. *Science*, 2021, 373(6559): 1105 – 1109.
- [74] LIU D J, YIN H M, WANG G Q, et al. Spreading properties of a Lorentz-Gauss vortex beam propagating in biological tissues[J]. *Progress in Electromagnetics Research Letters*, 2019, 84: 83 – 89.
- [75] WANG W B, SHI L Y, LINDWASSER L, et al. Optical vortex beam transmission with different OAM in scattering beads and brain tissue media[C]//Proceedings Volume 9764, Complex Light and Optical Forces X. San Francisco: SPIE, 2016: 114 – 119.
- [76] BITON N, KUPFERMAN J, ARNON S. OAM light propagation through tissue[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 2407.
- [77] LI Y, FENG J, LI B L, et al. Influence of structural length-scale sensitivities on Hermite-Gaussian rectangular vortex beam propagation in biological tissues[J]. *Journal of Modern Optics*, 2022, 69(19): 1094 – 1102.
- [78] FU S J, SONG L N. On the penetration depth of orbital angular momentum vortex beams interacting with the human tissue[C]//2023 IEEE 11th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP). Guangzhou: IEEE, 2023: 1 – 2.
- [79] MEGLINSKI I V, LOPUSHENKO I, SDOBNOV A, et al. Orbital angular momentum in structured vortex beams: bridging the gap in biomedical imaging and diagnosis[C]//Proceedings Volume PC13006, Biomedical Spectroscopy, Microscopy, and Imaging III. Strasbourg: SPIE, 2024: PC130060S.
- [80] MAMUTI R, PEREZ N, PREECE D. Conservation of orbital angular momentum of light in scattering media[C]//Proceedings Volume 13112, Optical Trapping and Optical Micromanipulation XXI. San Diego: SPIE, 2024: 28 – 30.
- [81] MAMANI S, SHINTRE S, LI Z, et al. OAM transmission of polarized multipole laser beams in rat cerebellum tissue[J]. *Optics Communications*, 2023, 532: 129241.

- [82] KHANOM F, MOHAMED N, LOPUSHENKO I, et al. Twists through turbidity: propagation of light carrying orbital angular momentum through a complex scattering medium[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 20662.
- [83] HE Y C, HUANG Z L, ZENG Q F, et al. Harnessing spin and orbital angular momentum light for optimal algae growth[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 8564.
- [84] DUAN M L, TIAN Y N, ZHANG Y M, et al. Influence of biological tissue and spatial correlation on spectral changes of Gaussian-Schell model vortex beam[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 134: 106224.
- [85] 张超. 随机电磁高斯-谢尔模型光束在生物组织中传输特性的研究 [D]. 太原: 中北大学, 2017.
- [86] 吴云光. 随机电磁高斯-谢尔模型涡旋光束在生物组织中传输特性的研究 [D]. 太原: 中北大学, 2018.
- [87] 段美玲, 杜娇, 赵志国, 等. 部分相干圆刃型位错光束在生物组织中的动态演化 [J]. *光子学报*, 2021, 50(9): 0929001.
- [88] DUAN M L, HE G M, FENG J J, et al. Coherence and polarization behaviors of partially coherent circular edge dislocation beam in biological tissue[J]. *Optik*, 2023, 293: 171402.
- [89] WU Y Q, ZHANG Y X, WANG Q, et al. Average intensity and spreading of partially coherent model beams propagating in a turbulent biological tissue[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2016, 184: 308 – 315.
- [90] NI Y Z, ZHOU Y M, ZHOU G Q, et al. Characteristics of partially coherent circular flattened Gaussian vortex beams in turbulent biological tissues[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(5): 969.
- [91] ZHANG H H, CUI Z W, HAN Y P, et al. Average intensity and beam quality of Hermite-Gaussian correlated Schell-model beams propagating in turbulent biological tissue[J]. *Frontiers in Physics*, 2021, 9: 650537.
- [92] CHIB S, DALIL-ESSAKALI L, BELAFHAL A. Partially coherent beam propagation in turbid tissue-like scattering medium[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2023, 55(7): 602.
- [93] MIN E, BAN S, LEE J, et al. Serial optical coherence microscopy for label-free volumetric histopathology[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 6711.
- [94] SCHMITT J M, KUMAR G. Turbulent nature of refractive-index variations in biological tissue[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(16): 1310 – 1312.
- [95] TUCHIN V V. Tissue optics: light scattering methods and instruments for medical diagnostics[M]. 3rd ed. Bellingham: SPIE Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers Press, 2015.

(编辑: 李晓莉)