

专题: 量子光学原理与应用

基于量子光源的光谱与成像*

傅鹏程^{1) #} 张彦之^{1) #} 徐兴奇²⁾ 刘旭¹⁾ 胡慧珠¹⁾ 蔡晗^{1) †}

1) (浙江大学光电科学与工程学院, 极端光学技术与仪器全国重点实验室, 杭州 310027)

2) (浙江大学物理学院, 全省微纳量子芯片与量子调控重点实验室, 杭州 310027)

(2025年11月7日收到; 2026年2月25日收到修改稿)

光谱测量与成像技术的进步已成为生命科学与材料科学研究中的关键表征手段。然而, 在针对光学响应微弱的样品(如低维材料、活体细胞等)进行实际观测时, 高功率激发光往往引入显著经典噪声, 并造成不可忽视的光致损伤, 从而限制了光学测量的信噪比与应用范围。在此背景下, 具备特殊量子统计特性的非经典光源(如纠缠光与压缩光)为实现超越经典极限的信噪比提升提供了极具潜力的解决方案。本文聚焦于量子增强光谱与成像领域, 系统梳理了基于纠缠光与压缩光两类重要量子光源的最新研究进展。纠缠光凭借光子间的量子关联特性, 在关联成像、非探测光子成像及超快干涉测量等应用中展现出卓越的抗噪声能力; 而压缩光则通过压缩光场噪声, 在位移传感、等离激元探测及非线性显微成像等方面显著提升了探测灵敏度与信噪比。本文进一步系统阐述了量子光源在提高信噪比、降低光致损伤、提升时间分辨率以及增强非线性转换效率等方面的独特优势, 并分析了当前制约量子成像技术实用化的关键挑战, 包括光源亮度低、系统损耗大等问题。最后, 对该领域未来的发展方向进行了展望。

关键词: 量子精密测量, 量子成像, 纠缠光, 压缩光**DOI:** 10.7498/aps.75.20251515**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251515

1 引言

光学传感是探索微观世界、理解物质相互作用的基石。现代光学显微光谱与成像技术通过获取空间与能量信息, 形成包含四维的高光谱数据, 为解析微观物质结构、组分及其时空演化提供了重要的光谱“指纹”, 已成为生物医学、材料学等领域机制研究与探索的重要支撑手段^[1-5]。在实际应用中, 各领域对探测信噪比、分辨率和灵敏度的更高需求永无止境, 然而, 经典光学的光谱成像正面临一个难以逾越的根本性瓶颈, 即散粒噪声极限。这种源于

光子在探测过程中固有统计涨落的噪声, 已成为光学探测灵敏度与测量精度的最根本限制。虽然增大激发或探测光的功率可以在一定程度上提升信噪比与灵敏度, 但在众多应用场景中, 高注入功率会带来破坏性效应: 例如在活体生物成像中, 过高的光功率可能导致光损伤; 而在精密测量中, 强光又会引入反作用噪声, 降低测量精度。因此, 如何在弱光条件以及光功率受限的条件下实现更高的灵敏度与精度, 成为光谱成像领域亟待解决的核心挑战。

正是这一挑战, 促使研究者将光场的非经典特性引入光学传感技术。近五十年来, 量子光学的理论与实验飞速发展, 揭示了光场的深层量子机制,

* “量子通信与量子计算机”国家科技重大专项(批准号: 2024ZD0302200)、国家重点基础研究发展计划(批准号: 2024YFA1408900)、国家自然科学基金(批准号: 12404573, 12434020, 12325412, 12374335, U21A20437, 11934011)、浙江省自然科学基金(批准号: LZ24A040001, LR25A040002)、中央高校基本科研专项资金(批准号: 024FZZX02-01-02)和浙江省“尖兵”“领雁”研发计划(批准号: 2025C01028)资助的课题。

同等贡献作者。

† 通信作者。E-mail: hancai@zju.edu.cn

例如压缩光的提出与制备^[6-8]、纠缠光的产生^[9-11]、双光子干涉^[12]和量子诱导相干^[13]等实验,为突破经典测量极限提供了全新可能.与遵循泊松分布的经典相干光源不同,量子光源(如纠缠光、压缩光)中的光子间存在非经典的关联性质.大量实验证明,这些独特的量子关联可用于实现量子增强的测量与传感.例如,20世纪提出的压缩光增强引力波探测灵敏度的方案已成功实现^[14];随着探测技术的不断进步,纠缠光子对在时间、动量与能量等维度上的关联特性也在近十年得到了深入研究与应用^[15,16].目前,量子技术正逐步应用于显微光谱与成像领域^[17,18],展现出突破经典测量限制的巨大潜力与应用价值.

在此背景下,本综述对快速发展的量子光谱与成像领域进行系统梳理与回顾,重点围绕纠缠光与压缩光两类典型的量子光源展开深入探讨.第2节将介绍基于纠缠光的光谱与成像,其核心研究方法是利用纠缠光子对在时间、空间与能量等维度的关联特性,在极弱光条件下实现噪声免疫、高精度与高灵敏的光谱与成像.第3节将介绍基于压缩光的精密测量,其核心方法是利用压缩光抑制散粒噪声极限,并利用频谱仪或锁相放大器读取调制于压缩度频率范围内的待测信号,从而在信号提取过程中突破散粒噪声极限,提高探测灵敏度.本文旨在通过总结现有工作的创新性与局限性,为国内外量子成像领域的研究者提供新思路,推动量子光学技术从实验室走向更广泛的实际应用.

从研究思路的演进来看,量子光谱与成像并非沿单一技术路线线性发展,而是围绕“在弱光与光功率受限条件下提升信噪比并扩展可获取信息的维度”这一共同目标,形成了若干并行的实现范式.就量子资源而言,纠缠光主要依托时空/能量关联与双光子全同性,发展出(i)符合计数驱动的关联成像与噪声抑制,(ii)量子诱导相干驱动的跨波段成像/光谱(以可见探测替代红外探测),以及(iii)基于HOM干涉的超快时间分辨表征;压缩光则以亚散粒噪声的场涨落压缩为核心,通过平衡零拍与调制解调等兼容方案,在位移检测、折射率传感与非线性显微中实现在标准量子极限之后的进一步提升.对应地,不同路线的关键瓶颈也呈现差异化:纠缠路线更受制于光子通量与符合探测效率,压缩路线更受制于系统损耗、相干噪声与可用波段范围.本文据此以量子资源-探测范式-应用场景-关键

瓶颈的框架组织全文,以为读者提供较清晰的体系梳理与比较视角.

2 基于纠缠光的量子成像

纠缠光是一种具有强量子关联的光子对,可通过非线性介质(晶体、原子气体等)的自发参量下转换(spontaneous parametric down-conversion, SPDC)过程产生.由于纠缠光子对在产生时遵循能量与动量守恒,因此表现出在时间、动量、能量上的关联特性;对于非简并的纠缠光子对,还同时存在能量关联的特征.时间关联特性一般可通过两个单光子探测器进行符合计数来观测,如图1(b)所示.纠缠光产生的信号光与闲频光在时间上几乎同时到达探测器,因而在延时为零时符合计数率最高.空间或动量关联或动量反关联特性则可借助两个高灵敏度单光子相机进行探测^[16,19].图1(c)为相机拍摄到的空间光斑分布^[15],若将相机置于非线性晶体的像平面,可获取纠缠光的空间关联分布;而将其置于傅里叶面,则可观测到动量反关联的特征^[16],如图1(d)所示.

2.1 量子关联

基于上述时空关联特性,纠缠光可在成像过程中实现对非关联噪声(例如强光背景与探测器噪声)的有效抑制,这一效果已在光谱成像、相位与全息成像等场景中得到广泛验证.目前常用的关联成像方案主要包括3类:利用纠缠光时间关联特性实现的双光子符合成像,结合单光子探测器与相机的预报光子(触发式)成像,以及使用双相机或单相机两个子区域的空间关联成像.图2展示了3种典型方案的示意图.双光子符合成像^[20](图2(a))将纠缠光的一支聚焦于样品上并进行逐点扫描,利用两个单光子探测器在每个像素上进行时间域的符合计数.由于在焦点处关联光子的计数较高,该方案相比于利用相机进行空间模式关联探测的方案,能够显著提高单像素上的符合计数率,从而获得相对更高的成像质量.预报光子成像^[21]通过探测到闲频光子事件后触发相机曝光,有效排除时间尺度上的非关联光子以及电学噪声的干扰(图2(b)).而空间关联成像^[22,23]直接利用纠缠光子对的空间关联性质提取空间关联信息,例如计算探测光与闲频光的关联^[22]或协方差^[24],从而实现高信噪比的样品分析,展现出出色的抗噪效果.

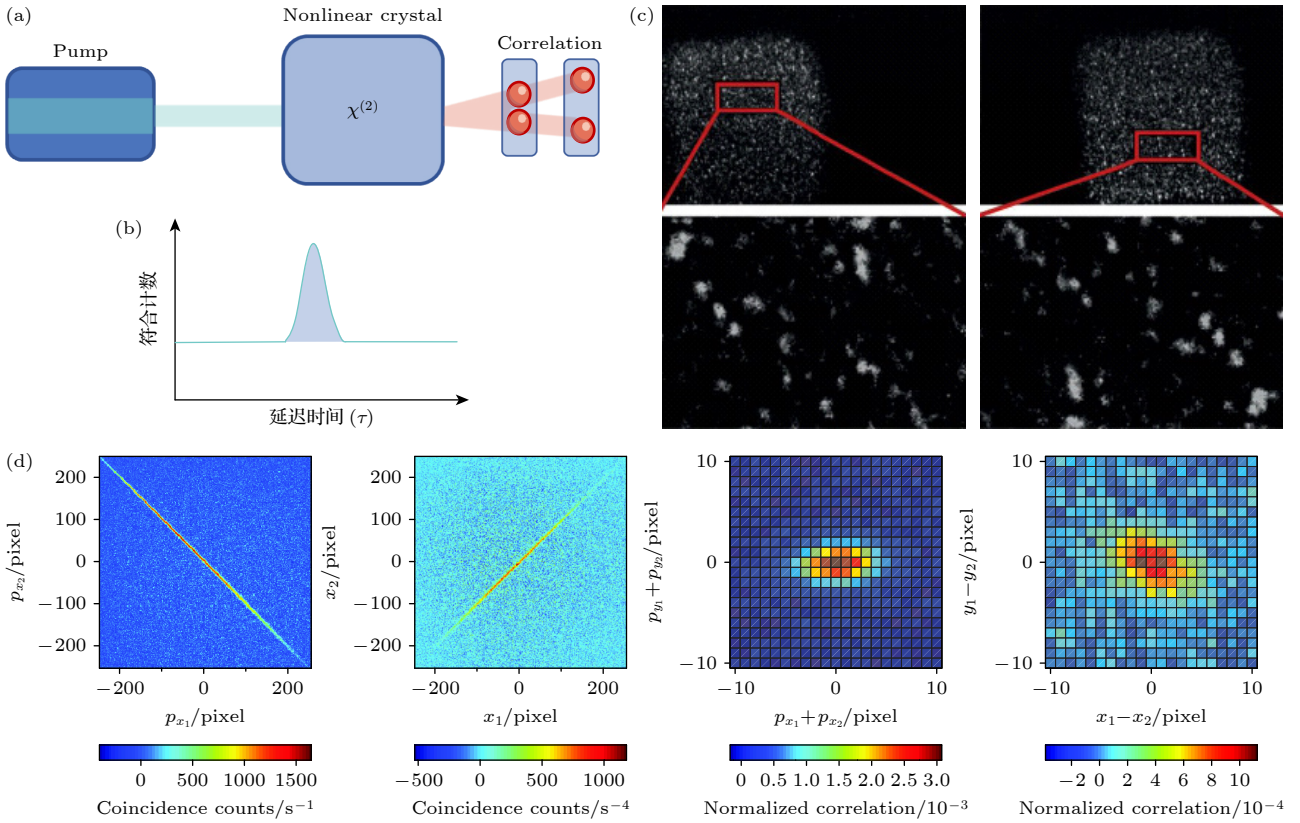


图 1 纠缠光的时空关联特征 (a) 单频激光泵浦二阶非线性晶体产生纠缠光子对的示意图; (b) 纠缠双光子符合计数示意图; (c) 相机拍摄到的纠缠光子对的关联成像^[15], 左右图分别为两束光 (信号光与闲频光) 在相机不同位置进行的同时成像; (d) 纠缠光子对的空间关联与动量反关联的表征^[16]

Fig. 1. Spatiotemporal correlation properties of entangled photon pair: (a) Schematic of entangled photon pair generation by pumping a second-order nonlinear crystal with a single-wavelength laser; (b) schematic of coincidence counting of entangled photons; (c) correlation imaging of entangled photon pairs captured by a camera^[15], the left and right images show simultaneous imaging of the signal and idler beams at different camera positions; (d) characterization of spatial correlation and momentum anti-correlation of entangled photon pairs^[16].

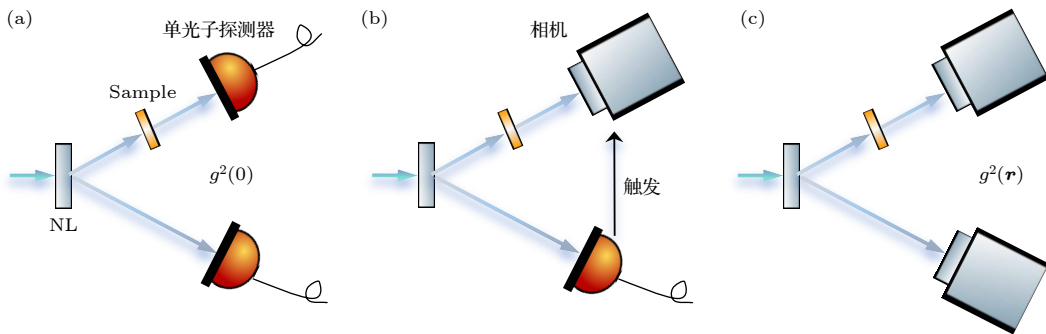


图 2 利用纠缠光子对进行光谱成像应用的 3 种探测方式 (a) 双光子符合成像, 通过一对单光子探测器对纠缠光子对在时间域上进行关联成像; (b) 预报光子成像, 当单光子探测器记录到纠缠光事件后, 触发相机进行曝光采集; (c) 空间关联成像, 相机同时拍摄纠缠光的空间模式分布, 通过计算空间关联特征进行成像

Fig. 2. Three detection schemes for spectral imaging using entangled photon pairs: (a) Temporal correlation imaging with a pair of single photon detectors; (b) herald imaging, where a single-photon detector triggers camera exposure upon recording an entangled photon event; (c) spatial correlation imaging, where two cameras capture the spatial mode distribution of entangled photon pairs, and imaging is achieved by computing its correlation features.

目前, 基于纠缠光关联特性实现的量子成像已在多个方向实现了量子抗噪效果, 包括亚散粒噪声

的高信噪比成像^[15,25-31](图 3(a))、量子增强的全息与定量相位成像^[23,32,33]、分辨率增强成像^[20,23,24]

(图 3(b))、图像抗噪^[20,22,24]与图像分割^[34,35](图 3(c))、亮场与暗场结合的多模态成像^[36](图 3(d))、红外成像^[37]以及量子增强的自适应光学成像^[38-40]等。在生物成像领域,纠缠光的关联特性也开始展现潜在应用,例如利用空间关联实现的高对比度、高分辨率成像性能可以更清晰地观察到细胞的结构(图 3(f)),以及量子关联可在三维生物成像中实现更好的抗噪效果(图 3(e))。此外,利用纠缠光的关联特性还有助于实现更优、更准确的像差校正^[38-40],从而实现无需导星的量子自适应光学成像。在考虑相差后的纠缠光关联成像往往失去信噪比和分辨率上的优势,但利用纠缠光增强的自适应光学技术,成像系统的相差可得到补偿,量子关联成像的信噪比与分辨率显著提升^[39]。

然而,此类基于光子关联的成像技术的主要瓶颈在于纠缠光源光子通量较低,导致关联成像所需采集时间较长。例如,现有的偏振纠缠光成像系统为实现 200 pixel×200 pixel 的一组空间关联图像,需要连续采集大约 17 h 的数据量(以 40 Hz 的帧率采集 250 万帧)才能实现信噪比为 20 的相位成像图^[23];而即使是利用聚焦并且空间扫描的成像方案,尽管可以在单像素上充分利用纠缠光子数高的优势,最新的实验中仍需要 1 s 的积分时间才能在单位像素上获取 40 左右的信噪比,采集同等 200 pixel × 200 pixel 的图像仍需要 11 h^[20]。纠缠光有限的光子对限制使得现有的纠缠光成像研究主要集中在弱光探测与抗噪方向上,与经典成像系统相比,在成像速度、成像分辨率等关键指标上仍存在显著差距。

2.2 双光子干涉

利用纠缠光的 Hong-Ou-Mandel (HOM) 干涉,可实现高精度的相位测量与时间分辨光谱成像。HOM 干涉实验直接验证了光子具有全同性,是量子光学中最重要的双光子干涉实验之一^[12,41],其实验装置如图 4(a) 所示。当两个全同光子分别入射至 50:50 分束器的两个输入端口时,由于光子的全同性,会发生非经典的聚束效应,使得两个光子总是在同一输出端被检测到。在两个光子完全不可区分的情况下,对分束器后的两个探测器进行符合计数时,会在零光程差位置观测到符合计数率的明显下降,甚至趋近于零,形成所谓的“符合计数凹陷”。当在光路中引入相位、延时、损耗等因素时,

会使两个光子变得可区分,从而对 HOM 干涉的符合计数率及“凹陷”的位置进行“编码”,可通过探测并解析符合计数谱实现对系统信息的准确测量。

HOM 干涉的一个重要优势在于其对样品引入的色散不敏感^[42,43],能够精确测量由光子与样品相互作用引起的微小相移^[44]。实验上,通过精确标定 HOM 符合计数凹陷的位置,可实现阿秒量级的时间分辨率^[45,46]。此外,该技术还可用于测量分子共振吸收后的退相位时间^[47-50]。Eshun 等^[48]利用 HOM 干涉测得染料的退相位时间为 102 fs,如图 4(b) 所示。HOM 干涉的另一个重要优势在于,通过测量光子关联性质可获得相位信息,避免了经典测量中干涉条纹受扰动带来的影响。2020 年, Ndagano 等^[51]基于空间多像素的 HOM 干涉探测实现了 HOM 显微镜,利用符合计数率提取样品深度信息。图 4(c) 是利用 HOM 显微镜实现的亚微米精度的三维样品成像^[52]。

2.3 量子诱导相干

量子诱导相干 (quantum induced coherence)^[13,53-55]是另一重要的量子光学效应,利用的是全同光子的路径不可区分性。其原理可通过图 5(a) 所示的双晶体过程进行说明:泵浦光首先经分束分为两束,一束入射至第 1 块非线性晶体 (NL1),产生信号光 1(s1) 与闲频光 1(i1);另一束泵浦光与由 NL1 产生的 s1 共同入射至第 2 块非线性晶体 (NL2),进一步产生信号光 2(s2) 与闲频光 2(i2)。理想情况下,当闲频光 i1 和 i2 的光学路径完全重合时,即无法区分两块晶体产生的两束闲频光,来自两块晶体的信号光 s1 与 s2 会发生干涉。然而,若遮挡住 i1(插入不透光的样品),表明在第 2 块晶体后可以区分出闲频光来自于晶体 2,即其来源变得可区分,则两束信号光之间的干涉将消失。因此,闲频光的重叠程度会影响信号光的干涉可见度。换言之,通过对信号光子干涉可见度的测量,可以间接推断出与样品发生相互作用后的闲频光 i1 的吸收与相位信息,而无需直接探测闲频光,从而实现非探测光子的量子成像 (quantum imaging with undetected photons, QIUP)。

基于这一原理,2014 年 Lemos 等^[54]利用量子诱导相干现象,首次实现了 QIUP 成像。实验中制备了非简并纠缠光子对(信号光为 810 nm,闲频

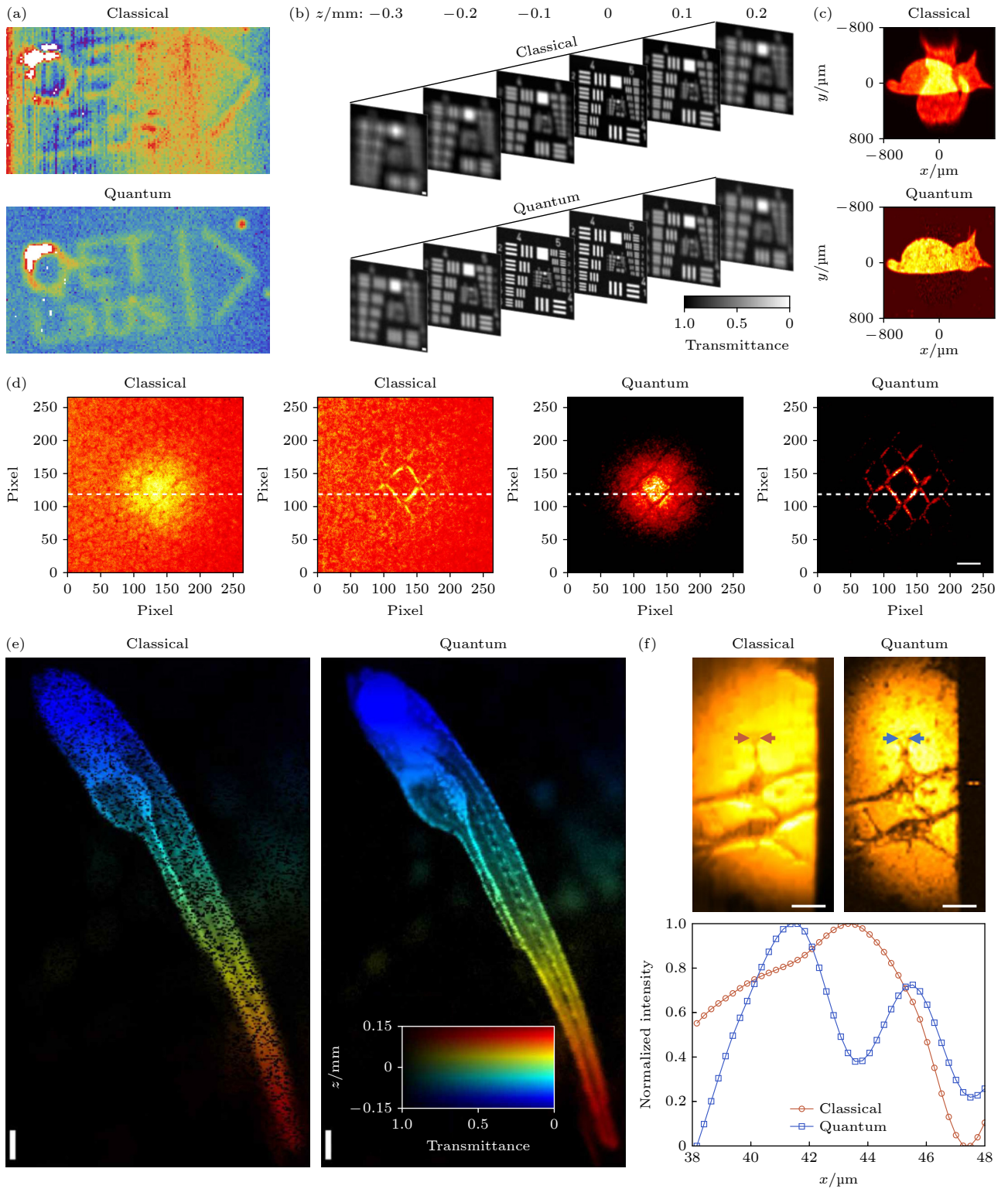


图 3 基于纠缠光关联成像的应用 (a) 亚散粒噪声成像^[31]; (b) 纠缠光具有更清晰的三维成像能力^[20]; (c) 纠缠光实现的图像分离^[34], 上图为直接光强探测得到的成像结果, 下图为纠缠光关联测量得到的结果; (d) 纠缠光实现的亮场与暗场成像^[36]; (e) 纠缠光实现的斑马鱼三维成像^[20]; (f) 纠缠光实现的细胞成像^[24], 上图为经典光与纠缠光关联成像的比较, 下图为箭头处的截面信号强度

Fig. 3. Applications of quantum microscopy based on correlation detection: (a) Sub-shot-noise imaging^[31]; (b) enhanced spatial resolution and sectioning performance with entangled photons^[20]; (c) quantum imaging distillation^[34], the upper panel shows the direct intensity detection result, while the lower panel displays the quantum image based on correlation measurement; (d) bright-field and dark-field imaging using entangled photons^[36]; (e) three-dimensional imaging of zebrafish using entangled photons^[20]; (f) cell imaging by entangled photons^[24], the lower panel is the line profile indicated by the arrows in the upper panel.

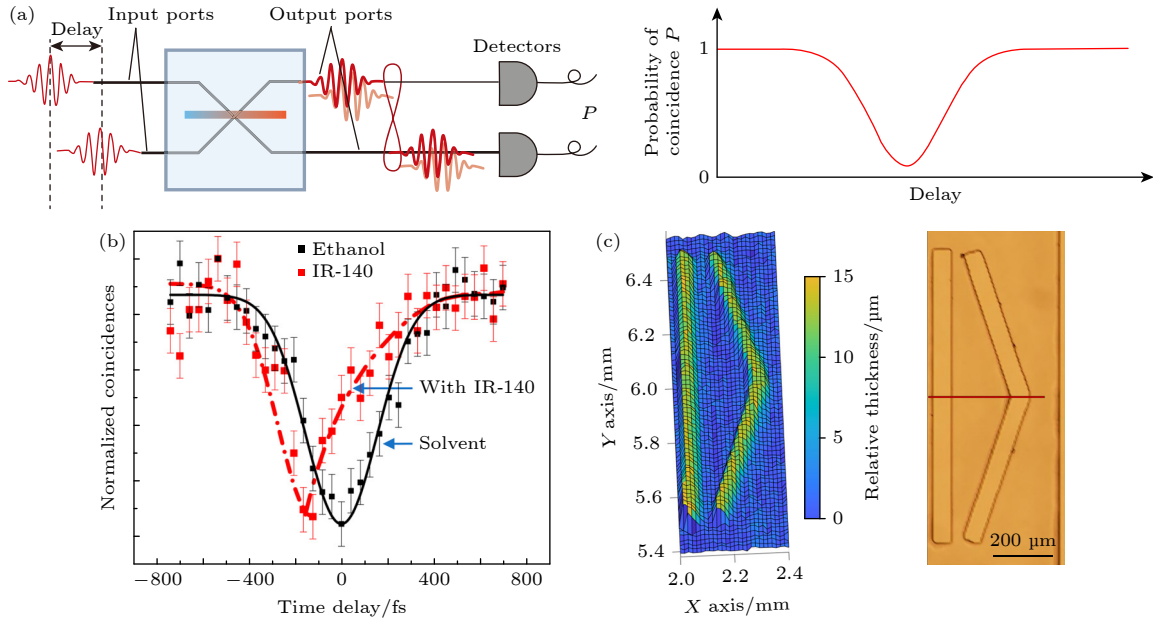


图 4 利用 HOM 干涉实现的量子成像 (a) HOM 干涉的装置图(上)与 HOM 干涉的结果示意图(下)^[41]; (b) 基于 HOM 干涉实现的超高时间分辨率的染料吸收表征, 实验中测量得到的退相位时间为 102 fs^[48]; (c) HOM 干涉显微镜用于表征样品的厚度^[52]
 Fig. 4. Quantum imaging based on HOM interference: (a) Experimental setup of HOM interference experiment (top) and schematic of the HOM dip (bottom)^[41]; (b) ultrafast time-resolved characterization of organic dye using HOM interference, showing a measured dephasing time of 102 fs^[48]; (c) HOM interference microscopy for sample thickness characterization^[52].

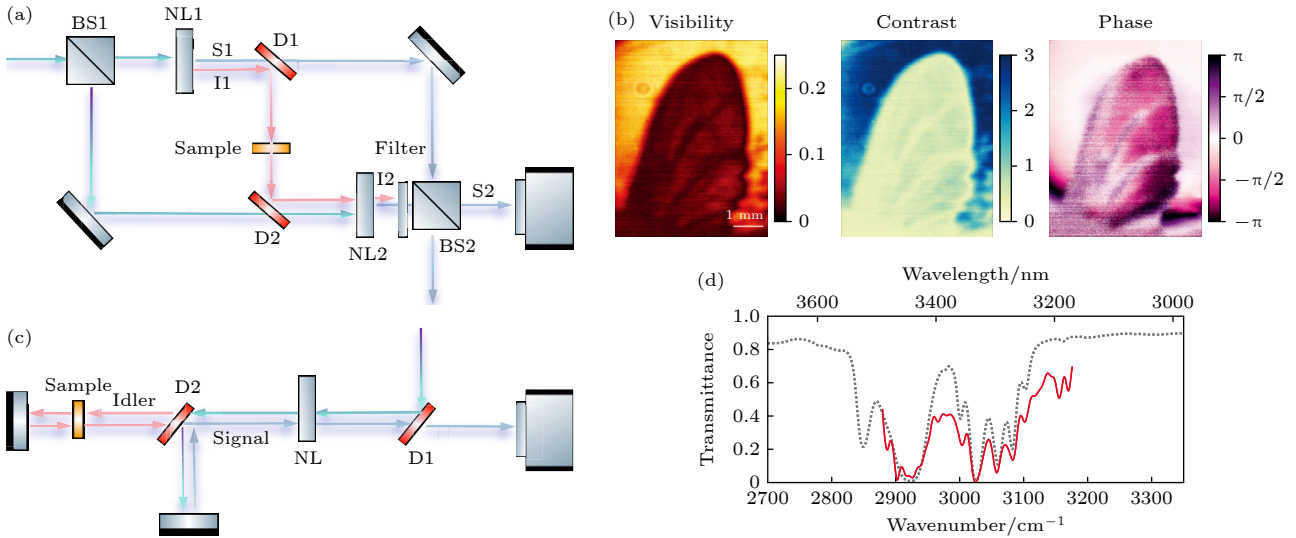


图 5 基于量子诱导相干实现的非探测光子的量子成像 (a) 双晶体构型的量子诱导相干装置图; (b) 紧凑型 QIUP 成像装置对苍蝇翅膀进行的成像结果图^[56]; (c) 单晶体构型的量子诱导相干成像装置; (d) 利用非简并纠缠光(信号光为可见光, 闲频光为中红外光)实现的基于量子诱导相干的红外光谱探测(红线)^[58], 虚线为传统红外光谱的结果, 样品为聚苯乙烯薄膜
 Fig. 5. Imaging and spectroscopy with undetected photon based on quantum induced coherence: (a) Experimental setup of quantum induced coherence imaging using a two-crystal configuration; (b) imaging results with compact QIUP imaging system^[56], the sample is fly's wing; (c) single-crystal configuration for quantum induced coherence imaging; (d) mid-infrared spectrum (red curve) based on quantum induced coherence using non-degenerate entangled light (the signal photon in visible range, while the idler is in mid-infrared)^[58]; the dashed line represents mid-infrared spectrum measured by classical a spectroscope, the sample is a polystyrene film.

光为 1550 nm), 对刻蚀信息的 0.5 mm 厚硅片进行了成像. 由于硅对 810 nm 不透明, 因此直接照射 810 nm 光无法通过透射获得样品信息. 然而,

1550 nm 的闲频光位于硅的透明窗口, 当把样品放置于闲频光 1 的光路中, 通过探测 810 nm 的信号光即可实现非探测光子的成像. 后续 Pearce 等^[56]

将其应用于生物成像中, 图 5(b) 是对苍蝇翅膀进行的 QIUP 成像, 可观察到具有连续变化的红外透射率的空间信息. 为了简化光路系统并排除晶体不完美造成的可见度下降, 量子诱导相干通常采用单晶体构型 (图 5(c)): 反射回来的剩余泵浦光与纠缠光以原光路返回到同一非线性晶体中, 其中泵浦光产生第 2 次 SPDC, 产生的信号光与反射回的信号光 s_2 共同入射到探测器进行干涉, 从而实现更高稳定性的量子诱导相干成像.

量子诱导相干技术的一个重要优势在于能够应对特殊波段^[54](如中红外与太赫兹波段) 成像中所面临的挑战, 这些波段的应用长期受限于缺乏高亮度光源和高灵敏度探测器. 通过非线性晶体制备非简并纠缠光, 可使信号光子处于可见光或近红外波段, 而闲频光处于中红外或太赫兹波段. 通过利用量子诱导相干对信号光进行探测, 可以利用经济的硅基探测器实现对中、远红外乃至太赫兹信号的高效、高速探测. 2016 年 Kalashnikov 等^[57] 原理性验证了基于量子诱导相干的中红外光谱测量方法, 其光谱波段被进一步推广至中远红外^[58-72] 甚至太赫兹^[73-76]. 图 5(d) 展示的是基于量子诱导相干探测到的中红外吸收光谱 (红线) 与经典红外光谱 (黑线) 的对比结果^[58]. 更重要的是, 量子诱导相干无需通过测量纠缠光子对的时间或空间关联即可能实现高速的量子光谱与成像, 目前已有工作展示了视频帧率的成像速度^[77-79]. 此外, 量子诱导相干的高信噪比与高效率特性使其可与经典计算成像方法相结合, 例如全息与离轴全息^[78,80]、光学相干层析^[64,81,82] 和合成孔径^[83] 成像.

该领域近年来发展迅速, 理论框架也日趋完善^[55,84-90]. Defienne 等^[18] 在最新综述中对量子诱导相干成像的分辨率与成像视场进行了细致的讨论与分析. 在量子诱导相干成像中, 可分辨模式数定义为成像视场尺寸与成像分辨率的比值, 是一个与成像放大倍数无关的常数^[18]. 多项理论分析与实验证实, 量子诱导相干的成像分辨率受限于经过样品的闲频光的光学衍射极限^[86,87,89,90]. 因此, 即使 QIUP 规避了红外探测器价格昂贵、效率较低的瓶颈, 该方案目前的成像分辨率仍受限于长波长红外的衍射极限. 进一步的理论研究表明, 通过近场成像方式, 可突破信号光波长的衍射极限, 实现基于非探测光子的量子超分辨成像^[88]. 目前, QIUP 的光谱成像研究主要集中在中红外与太赫兹波段,

Fuenzalida 等^[87] 提出可利用紫外或 X 射线的纠缠光源^[91-94], 对响应紫外以及 X 射线波段的成像样品进行可见光或近红外探测段的 QIUP 成像, 进一步拓展其应用潜力与光谱覆盖范围.

2.4 非线性光谱与成像

利用纠缠光子对的时间-能量关联特性还可以在非线性光学中发挥独特作用, 如可在极低光功率条件下实现双光子过程的高效激发. 在非线性光学如双光子荧光成像中, 双光子信号强度与泵浦光功率的平方成正比, 因此通常需要高瞬时功率的超快激光进行成像. 由于相干光在光子到达时间具有随机性, 同时吸收两个无关联光子的概率低, 而由 SPDC 过程制备的纠缠光源在时间上具有关联性, 能够被样品“同时”吸收, 如图 6(a) 所示. 这使得纠缠光的双光子激发效率与入射光功率呈线性关系, 因此其在极低光功率条件下可以有效增强双光子荧光^[95-98] 或二次谐波^[99,100] 信号, 并保留双光子成像的“光学切片”性能^[101]. 如图 6(b) 所示, 纠缠光子激发的二次谐波信号强度随光强呈线性增长^[100]. 图 6(c) 展示了纠缠光子双光子荧光成像的效果^[97], 实验表明即使在激发光功率降低六个数量级的情况下, 纠缠双光子成像仍可获得与经典方法相当的信噪比. 这一结果意味着纠缠光成像可显著避免高功率带来的样品光损伤以及荧光分子光漂白问题, 在近年来得到广泛关注. 然而, 关于纠缠双光子能否真正增强双光子吸收截面仍存在争议, 多个实验组报道了未能复现纠缠光的双光子荧光增强^[102-107], 并提出多种可能的经典机制, 如热吸收^[106]、单光子散射^[105] 等, 来解释实验中所观察到的线性响应行为.

值得关注的是, 利用纠缠光子对的时间-能量纠缠特性, 有望突破经典超快光谱表征中的时间-光谱分辨率带宽限制^[108-111], 在保持飞秒级时间分辨率的同时, 仍可获得极高的光谱分辨率. 已有理论研究表明 (图 6(d)), 这一量子优势为发展兼具高时间分辨率与光谱分辨率的超快拉曼光谱技术提供了新途径^[111].

2.5 小结

本节探讨了纠缠光在光谱测量与成像中的独特优势, 重点分析了其量子关联特性如何在极低光功率 (纳瓦及以下) 条件下实现经典光 (相同功率)

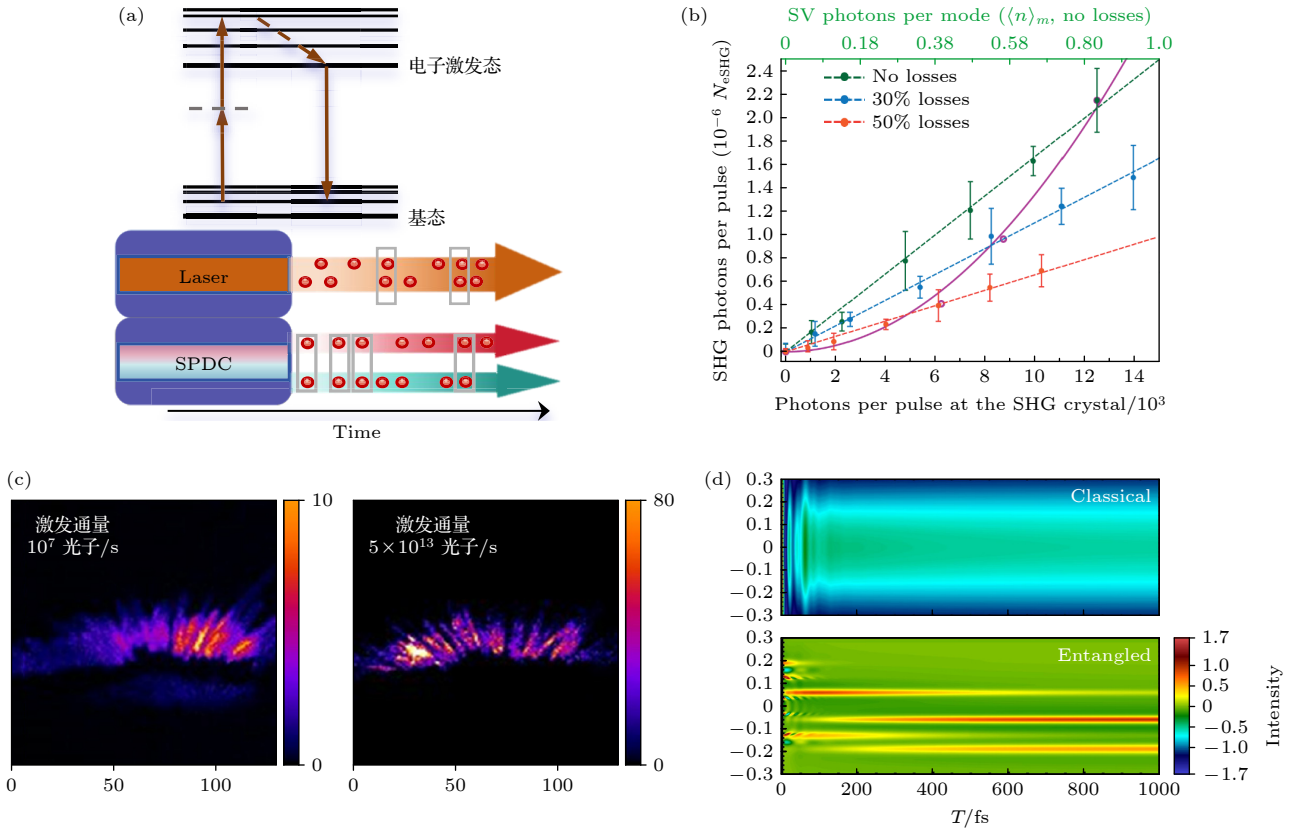


图 6 基于纠缠光子对的非线性光学应用 (a) 荧光分子的双光子荧光激发过程的能级跃迁过程(上), 纠缠光光源与经典光源的比较; (b) 经典光(虚线)与纠缠光子对(实线)实现的二次谐波信号增强的功率依赖表征^[100]; (c) 纠缠光增强的双光子荧光成像与经典光的双光子荧光的比较^[97]; (d) 纠缠光增强的超快时间分辨受激拉曼谱(上)与经典受激拉曼谱(下)的比较^[111]

Fig. 6. Nonlinear optical applications based on entangled photon pair: (a) Energy level transition diagram for two-photon fluorescence excitation in fluorescent molecules (top), and comparison between entangled and classical light sources (bottom); (b) power dependence of second-harmonic generation (SHG) enhancement using classical light (dashed lines) and entangled photon pairs (solid line)^[100]; (c) comparison between two-photon fluorescence imaging with entanglement enhancement (left) and classical light (right)^[97]; (d) comparison between time-resolved stimulated Raman spectroscopy with entangled photons and classical light (bottom)^[111].

难以企及的性能: 基于时空关联探测的高鲁棒性抗噪成像、利用量子诱导相干实现的可见至中远红外宽波段光谱成像、借助光子全同性实现的高精度时空信息解析, 以及基于时间-能量纠缠对非线性光学过程的增强效应. 然而, 纠缠光在实际应用中面临的巨大挑战是其极低的光通量及必须依赖符合技术等关联探测方案, 导致其在分辨率、信噪比、成像速度等性能上难以超越现有经典光学技术在高功率(未引入光损伤)下的成像效果. 面向需要较高光功率的应用场景, 另一类重要的量子光源——压缩光, 在提升信噪比与兼容现有系统方面表现出更直接的潜力. 在此基础上, 从发展趋势看, 纠缠光路线正由“概念验证型的抗噪成像”逐步转向“亮度提升与高维并行探测驱动的实用化”, 其关键矛盾集中在光源通量、系统效率与高速符合读出三者的协同优化.

3 压缩光实现的量子成像

压缩光同样利用非线性光学过程产生量子关联, 其核心特征是在遵循海森伯不确定性原理的前提下, 通过增大光场某一正交分量的不确定度, 使另一正交分量的涨落“压缩”至标准量子极限以下. 尽管利用纠缠光的量子关联已能实现超越散粒噪声极限的成像^[27,29], 压缩光在传感与成像应用中具有以下显著优势: 首先, 压缩光可实现毫瓦至数十毫瓦量级的光功率^[112], 远高于通常处于纳瓦量级的纠缠光源^[18], 更适用于需要较高光通量的场景; 其次, 压缩光的量子优势(即压缩度)可通过平衡零拍探测等常规光电探测技术进行高效测量, 无需依赖昂贵的单光子灵敏度探测器. 这些特性使得压缩光不仅能与现有光学系统(如调制解调、泵浦-探

测技术)良好兼容,也为其在更广泛的实际应用中突破标准量子极限提供了可能.关于压缩光源的制备原理与理论基础,可参阅相关综述^[113,114].

3.1 压缩光增强的原子力显微镜

原子力显微镜作为一种经典的光力探测纳米成像系统,通过悬臂反射激光来检测在扫描过程中因针尖-样品相互作用引起的振动变化,实现高精度传感,从而获得纳米级分辨率的显微图像^[115,116].本质上,原子力显微镜的读出过程属于典型的光学位移测量:利用探测光照射悬臂,并通过位置敏感探测器(如四象限探测器)探测并利用锁相放大器解调出光斑位移信息,从而反演悬臂的微小位移.在此类光学位移测量中,探测灵敏度不仅受限于激光散粒噪声,在高功率条件下还受到由光动量传递所引起的反作用噪声的制约,即标准量子极限.在此背景下,压缩光为突破散粒噪声极限提供了直接途径.通过构造空间多模压缩光并应用于光斑位移测量,可显著降低探测通道中的散粒噪声,从而在光功率受限或反作用噪声不可忽略的条件下实现更优的位移测量灵敏度.

将多模压缩光应用于高精度位移测量,是量子增强技术最早取得突破的方向之一.早在2003年,Treps等^[117]利用构造的空间多模压缩光实现了激光指向信号的量子增强测量,为后续研究奠定了基础.具体而言,该研究通过相位板将单模压缩光构建为空间多模结构,并用于探测反射镜受调制引起的光斑位移.在考虑系统损耗后,实验中制备的4 dB压缩光最终实现了3.05 dB的噪声抑制,使位移测量精度提升约1.5倍,达到1.6 Å的位移测量精度.受压缩光的空间模式探测方案的启发,Taylor等^[118,119]于2013年采用相似的技术路线,成功实现对生物样品空间位移的量子增强测量.实验制备的6 dB压缩光,由于受到光学系统的损耗,最终获得了2.8 dB的量子提升,实现了对酵母细胞内脂滴均方位移测量46%的精度提升.

随着研究的深入,将压缩光与原子力显微镜这一典型位移测量系统直接结合成为顺理成章的发展方向.与通过模式转换构建空间多模场相比,直接利用具有空间多模特性的压缩光源是一种更高效的方案.Pooser和Lawrie^[120]利用窄线宽激光器泵浦铷原子的四波混频过程(见图7(a),(b)),产生双模压缩光,并据此成功研制出压缩增强的原子力

显微镜原型机.考虑与光功率相关的反作用噪声后,引入压缩光可以实现的原子力显微镜测量位移的探测极限如图7(c)所示.由于四波混频过程需要满足相位匹配条件,因此产生的双模压缩光具备空间反关联的噪声特性^[121].理论分析表明,这一特性与四象限探测器测量光斑位移的方案高度兼容.实验中,研究人员将4.5 dB的双模压缩光中的探测光照射至原子力显微镜悬臂,反射后与共轭光共同入射至四象限探测器,最终实现了4 dB的量子增强,如图7(d)所示.Pooser等^[122]在后续实验中通过非线性干涉仪的压缩增强方案实现了1.7 fm的探测灵敏度.值得注意的是,由于原子力显微镜的光路系统相对简单,光学损耗较低,因此能够更有效地保持压缩度,在精密力学测量与纳米成像领域呈现出巨大潜力.

3.2 表面等离子激元传感

双模压缩光已广泛应用于突破表面等离子共振(surface plasmon resonance, SPR)传感器的散粒噪声极限,从而提升传感灵敏度.SPR传感器是一类高精度的折射率传感装置,通过分析样品附着于金属表面所引起的SPR共振峰变化,实现对低浓度分子或折射率微小变化的光谱特异性检测^[114,123].然而,SPR传感的灵敏度不仅受限于样品的光损伤阈值以及等离子激元的饱和效应,过高的入射光功率还可能引起传感器结构变化,进而引起响应漂移并引入额外噪声^[123].因此,在光功率受限的条件下突破标准量子极限,对SPR传感技术的发展至关重要.

将压缩光引入SPR传感系统是实现这一目标的有效途径.早期研究已初步证明,压缩光在测量等离子激元的耦合角度时可由反关联获得5 dB的量子提升^[124,125].近期,Kamble等^[126]利用压缩光增强SPR传感蛋白质分子在金表面的黏附动力学过程,在样品实现4 dB的量子压缩情况下,对蛋白质黏附速率常数的测量灵敏度提高了60%.Dowran等^[127]则通过设计的超表面阵列结构,利用双模压缩光实现了对空气折射率的高精度传感(图8).在该实验中,由铷原子产生的双模压缩光中的探测光入射至超表面样品,透射后进入平衡零拍探测器与共轭光进行强度差检测(图8(a)).超表面结构放置于气体池内,通过函数发生器在200 kHz频率下驱动换能器,引入气体的折射率调制,进而对探测光

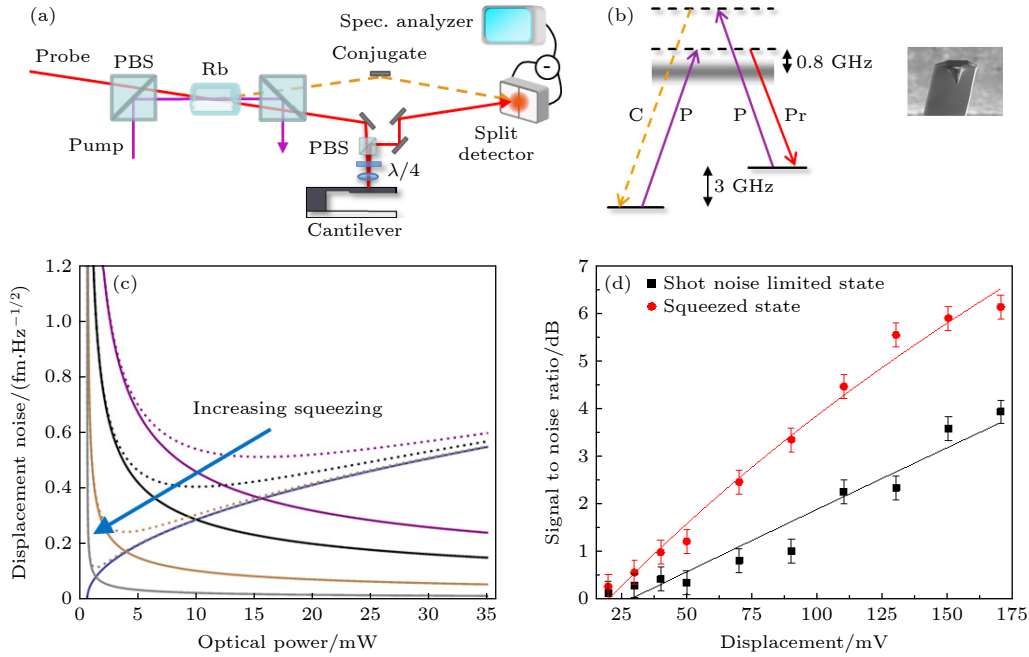


图 7 基于压缩光实现的量子增强原子力显微镜 (a) 利用压缩光增强的原子力显微镜装置图^[120]; (b) 铷原子产生双模压缩光时泵浦的四波混频跃迁示意图; (c) 在存在反作用噪声的情况下, 最小可探测位移随压缩度提高的变化情况, 其中蓝线为不考虑反作用噪声的情况, 虚线为引入反作用噪声的情况, 紫色、黑色、棕色、灰色分别代表压缩度为 0, 4, 13, 26 dB 的情况; (d) 相干光与压缩光测量位移的结果比较^[120]

Fig. 7. Quantum atomic force microscopy enabled by squeezed light: (a) Experimental setup for a squeezed light enhanced atomic force microscope^[120]; (b) energy transition diagram of four-wave mixing in rubidium for generating two-mode squeezed light; (c) minimum detectable displacement of squeezed light enhanced atomic force microscope considering back action noise (dashed line) for various squeezing levels, the purple, black, brown, gray line correspond to 0, 4, 13, 26 dB of squeezing; (d) comparison of cantilever displacement signals measured with squeezed light (red) and coherent light (blue), showing significant signal-to-noise ratio improvement with squeezed light^[120].

经过超表面样品后的透射率产生调制. 实验最终实现 4 dB 的噪声抑制, 并将折射率检测灵敏度提升 56%, 实验结果如图 8(b), (c) 所示. 近期, Dowran 等^[128] 进一步利用双模压缩光强度差噪声的空间关联特性, 实现了并行的多通道压缩增强传感, 为未来发展高通量、空间分辨的量子传感技术铺平了道路.

3.3 非线性光学成像

利用压缩光提升非线性光谱与成像的信噪比已得到深入研究, 其中压缩光增强的受激拉曼散射 (stimulated Raman scattering, SRS)^[112,129-137] 与受激布里渊散射 (stimulated Brillouin scattering, SBS)^[138,139] 光谱及成像尤为引人关注. SRS 和 SBS 均为非线性光学过程^[140], 通过泵浦光与斯托克斯光的能量差匹配样品中不同的振动能级: SRS 激发分子化学键层面的振动模式, 而 SBS 激发材料或介质中的声学振动模式, 从而实现对样品的光谱分辨表征. 由于这两个过程探测的是分子或材料内禀的振动光谱信息, 无需依赖外源荧光标记, 同时非

线性效应可有效放大信号强度, 因此被广泛应用于生物成像与材料表征^[2,141-144]. 然而, 这些非线性过程的激发通常需要高功率激光, 极易对生物样品造成光损伤. 因此, 利用压缩光在低入射功率下抑制噪声, 从而在保证信噪比的同时降低光毒性, 成为推动非线性显微成像发展的重要方向^[130,112].

在量子增强 (quantum-enhanced, QE) 受激拉曼散射领域, De Andrade 等^[129] 率先实现了压缩增强的 SRS 光谱, 但其采用的连续单模压缩光在激发非线性过程方面效率较低. 为在生物系统中实现 QE-SRS 成像的应用, Casacio 等^[130,137] 制备了功率达 3 mW、压缩度为 1.2 dB 的超快皮秒压缩光, 并成功对酵母细胞中的脂质分布进行了表征与成像, 实验装置如图 9(a) 所示. 该系统与经典受激拉曼显微镜类似: 使用一台波长可调的激光器作为 SRS 泵浦光, 调制于 20 MHz, 并与制备的压缩斯托克斯光在时域和空间上重合后共同激发样品产生受激拉曼信号. 斯托克斯光同时作为探测光, 用于检测受激拉曼增益, 最终通过频谱仪读取信号

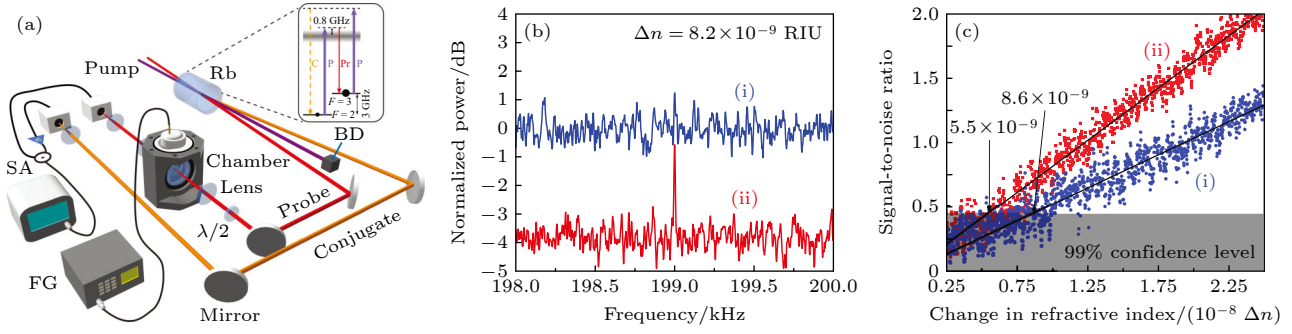


图 8 基于等离子体元实现的压缩光增强的折射率传感^[127] (a) 实验装置; (b) 由压缩光与相干光探测到的折射率调制信号; (c) 利用相干光与压缩光测量折射率调制的探测极限表征. 其中 (i) 相干光的测量结果, (ii) 压缩光的测量结果

Fig. 8. Squeezed-light-enhanced refractive index sensing based on a plasmonic metasurface^[127]: (a) Schematic of the experimental setup; (b) refractive index modulation signals detected with squeezed light (red) and coherent light (blue); (c) sensitivity characterization by squeezed light and coherent light. Here, the noise floor for squeezed light measurement (ii) is below the shot-noise level of the coherent light measurement (i).

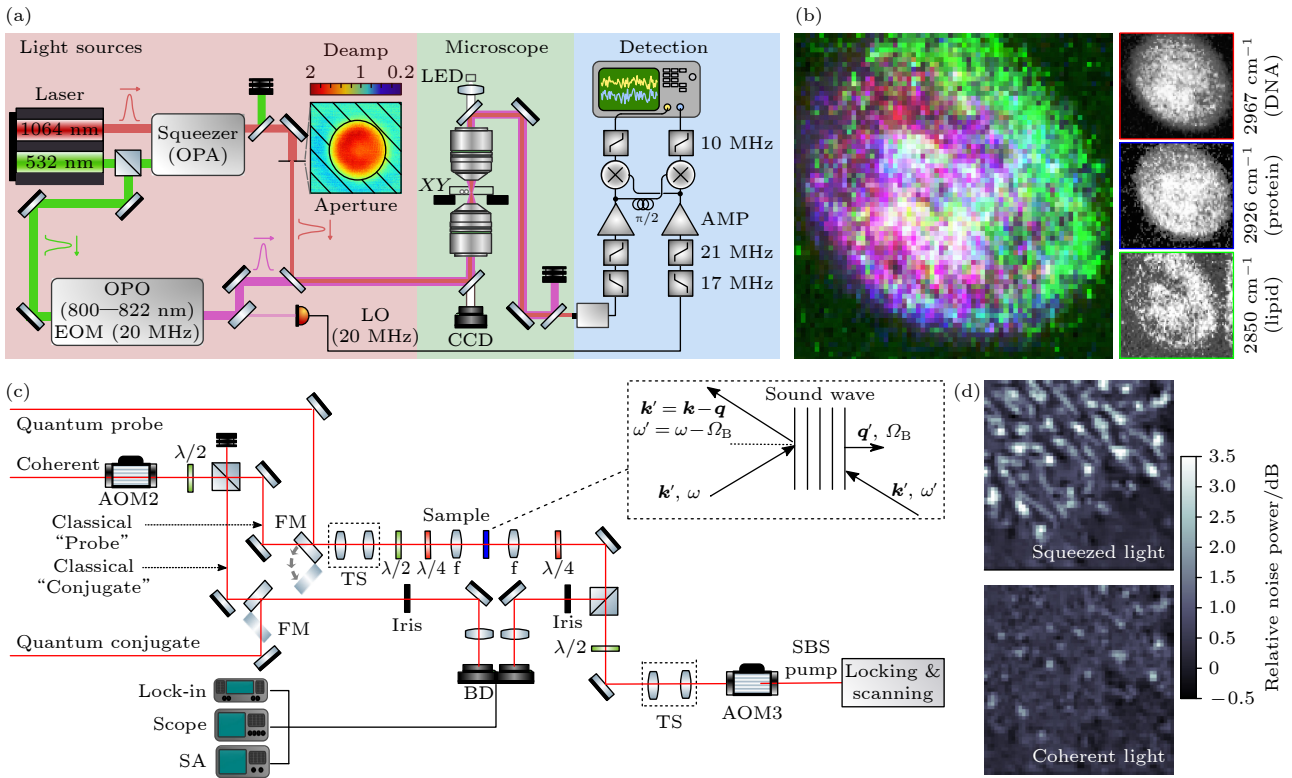


图 9 压缩光增强的非线性光学显微成像 (a) 基于单模压缩光实现的量子增强受激拉曼散射显微镜^[137]; (b) 对酵母细胞内的多个化学组分进行的高光谱成像结果; (c) 基于双模压缩光实现的量子增强受激布里渊散射显微镜^[139]; (d) 对肿瘤细胞利用压缩光(上)与相干光(下)进行受激布里渊成像的比较

Fig. 9. Squeezed light enhanced nonlinear optical imaging: (a) Schematics of quantum enhanced stimulated Raman scattering (QE-SRS) microscope based on single-mode picosecond squeezed light^[137]; (b) multi-spectral imaging of single yeast cells with QE-SRS microscope; (c) schematic of a quantum enhanced stimulated Brillouin scattering (SBS) microscope based on two-mode continuous-wave squeezed light^[139]; (d) SBS imaging of 4 T1 breast cancer cell, squeezed-light image (top), coherent-light image (bottom).

的功率谱. 然而, 由于超快压缩光的压缩度通常低于连续压缩光, 且光学系统损耗不可避免, Casacio 等^[130] 在最终结果中仅实现了约 0.6 dB 的量子提升, 对应于功率谱的信噪比提升约 14%. 后续他们对酵母细胞进行了高光谱成像^[137](如图 9(b) 所示),

在脱氧核糖核酸、蛋白质、脂质通道分别实现了 0.9, 1.1, 0.9 dB. 此后, Xu 等^[112,133-136] 围绕提升压缩光源功率、压缩度以及优化探测方案等方面开展了深入研究, 致力于将 QE-SRS 的灵敏度推向甚至超越经典系统的水平.

与 QE-SRS 类似, 量子增强的受激布里渊成像 (QE-SBS) 也取得了初步进展. 由于布里渊频移 (千兆赫兹量级) 远小于拉曼频移, QE-SBS 对光源线宽要求更为苛刻, 并且需要利用极窄线宽的滤光片 (例如原子气体池) 滤除残留的泵浦光, 因此利用铷原子产生的双模压缩光成为 QE-SBS 的理想光源. 实验装置如图 9(c) 所示, Li 等^[138,139] 利用铷原子四波混频产生的窄线宽双模压缩光, 通过混频探测方案, 将连续压缩光调制于 400 kHz, 泵浦光调制于 300 kHz, 通过透镜聚焦至样品, 再借助锁相放大器探测位于 700 kHz 的混频 SBS 信号, 最终实现了 3.5 dB 的噪声抑制. 然而, 当前 QE-SBS 成像的综合性能与最先进的受激布里渊显微镜^[142-144] 相比仍存在显著差距, 其主要制约因素在于激发 SBS 过程所需的光源峰值功率不足. 突破该限制, 将成为推动本领域未来发展的关键核心技术挑战.

3.4 小结

本节梳理了基于压缩光的光谱与成像应用, 包括利用空间模式的噪声关联实现位移精密检测与成像、结合表面等离激元增强折射率传感灵敏度, 以及基于压缩光实现非线性光学的光谱与成像. 相较于纠缠光的关联特性, 压缩光所具备的压缩度这一量子资源在应用中的呈现更为直接; 同时, 压缩光应用通常易于与调制解调等常用技术兼容, 使其能够在经典系统达到标准量子极限后, 实现进一步的性能提升. 然而, 压缩光在实际应用中也面临若干挑战. 首先, 高压缩的量子光源制备具有较高技术难度, 且光学损耗以及相干噪声会显著降低有效压缩度, 导致在实际应用场景中量子增强效果受限. 其次, 压缩光的波长受限于产生过程, 一般不具备如纠缠光可实现的宽谱可调谐性, 因而在应用场景中缺乏纠缠光的灵活性. 因此, 压缩光进一步走向实用化的关键, 往往体现为“与既有显微-传感平台的工程兼容”与“压缩度在真实系统中的保持”之间的权衡: 未来提升空间在于降低损耗与低频压缩和多通道读出的联合推进.

4 总结与展望

近三十年来, 量子光谱与成像技术已逐步从原理验证阶段迈向实用化探索, 并在多个光谱与成像系统的生物应用中展现出量子增强的噪声免疫、高

灵敏度信号提取以及亚散粒噪声成像等优异性能. 在等效信噪比条件下, 量子成像所需的光功率显著降低, 从而有效减轻对样品的光损伤, 使得对光敏感系统与活体生物样本进行长时间、无损观测成为可能. 同时, 其提升的灵敏度与空间分辨能力, 也为探索微观结构的形貌、成分变化及其功能关联提供了不可替代的研究工具.

然而, 在实际应用中, 量子光谱与成像技术仍面临诸多技术挑战. 在纠缠光应用方面, 其主要限制在于光源亮度不足和探测效率有限. 实验上可采用超短脉冲泵浦^[145]、引入光学腔增强^[146]、引入种子光^[147], 以及利用高非线性系数的铌酸锂波导为介质^[148]等技术路线来提升纠缠光源的亮度. 此类方法不仅可以提升现有关联成像的探测效率, 也有望进一步推动纠缠光在非线性光学过程中的应用, 例如实现真正的纠缠双光子荧光成像^[95]以及突破傅里叶极限的量子超快光谱探测^[111]. 在探测端, 系统性能的提升依赖于量子效率更高、响应速度更快、时间分辨率更优的新型探测器, 如单光子雪崩二极管相机^[149]与超导纳米线单光子探测器^[150]阵列等. 此外, 面对相机采集到的巨量时空关联数据, 可引入机器学习等先进算法, 以实现高效的信息解析与特征提取^[151,152].

在压缩光成像方面, 其未来发展可从两个方向推进: 一方面, 采用压缩度更高的光源可以进一步增强其量子优势. 目前, 国际上单模压缩光的压缩度已达 15 dB^[153], 双模压缩光也已实现 10 dB 的压缩度^[154]. 然而, 在成像应用中, 光学系统损耗 (尤其是高数值孔径物镜引入的损耗) 会严重影响压缩度的保持, 从而制约最终可实现的量子增强效果. 另一方面是发展低频压缩光技术^[155,156], 以实现与多像素探测器^[128]或相机^[157]的高效兼容. 随着低频压缩光源的持续改进, 基于压缩光增强的并行传感与成像技术有望在不久的将来实现应用.

参考文献

- [1] Schermelleh L, Carlton P M, Haase S, Shao L, Winoto L, Kner P, Burke B, Cardoso M C, Agard D A, Gustafsson M G L, Leonhardt H, Sedat J W 2008 *Science* **320** 1332
- [2] Cheng J X, Xie X S 2015 *Science* **350** aaa8870
- [3] Sigal Y M, Zhou R B, Zhuang X W 2018 *Science* **361** 880
- [4] Young G, Hundt N, Cole D, Fineberg A, Andrecka J, Tyler A, Olerinyova A, Ansari A, Marklund E G, Collier M P, Chandler S A, Tkachenko O, Allen J, Crispin M, Billington N, Takagi Y, Sellers J R, Eichmann C, Selenko P, Frey L,

- Riek R, Galpin M R, Struwe W B, Benesch J L P, Kukura P 2018 *Science* **360** 423
- [5] Park Y, Depeursinge C, Popescu G 2018 *Nat. Photonics* **12** 578
- [6] Caves C M 1981 *Phys. Rev. D* **23** 1693
- [7] Walls D F 1983 *Nature* **306** 141
- [8] Polzik E S, Carri J, Kimble H J 1992 *Phys. Rev. Lett.* **68** 3020
- [9] Kocher C A, Commins E D 1967 *Phys. Rev. Lett.* **18** 575
- [10] Freedman S J, Clauser J F 1972 *Phys. Rev. Lett.* **28** 938
- [11] Shih Y H, Alley C O 1988 *Phys. Rev. Lett.* **61** 2921
- [12] Hong C K, Ou Z Y, Mandel L 1987 *Phys. Rev. Lett.* **59** 2044
- [13] Zou X Y, Wang L J, Mandel L 1991 *Phys. Rev. Lett.* **67** 318
- [14] Aasi J, Abadie J, Abbott B P, et al. 2013 *Nat. Photonics* **7** 613
- [15] Jedrkiewicz O, Jiang Y K, Brambilla E, Gatti A, Bache M, Lugiato L A, Di Trapani P 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 243601
- [16] Moreau P A, Devaux F, Lantz E 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 160401
- [17] Moreau P A, Toninelli E, Gregory T, Padgett M J 2019 *Nat. Rev. Phys.* **1** 367
- [18] Defienne H, Bowen W P, Chekhova M, Lemos G B, Oron D, Ramelow S, Treps N, Faccio D 2024 *Nat. Photonics* **18** 1024
- [19] Defienne H, Reichert M, Fleischer J W 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 203604
- [20] Zhang Y D, He Z, Tong X, Garrett D C, Cao R, Wang L V 2024 *Sci. Adv.* **10** eadk1495
- [21] Morris P A, Aspden R S, Bell J E C, Boyd R W, Padgett M J 2015 *Nat. Commun.* **6** 5913
- [22] Gregory T, Moreau P A, Toninelli E, Padgett M J 2020 *Sci. Adv.* **6** eaay2652
- [23] Defienne H, Ndagano B, Lyons A, Faccio D 2021 *Nat. Phys.* **17** 591
- [24] He Z, Zhang Y D, Tong X, Li L, Wang L V 2023 *Nat. Commun.* **14** 2441
- [25] Blanchet J L, Devaux F, Furfaro L, Lantz E 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 233604
- [26] Brida G, Caspani L, Gatti A, Genovese M, Meda A, Ruo-Berchera I 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 213602
- [27] Brida G, Genovese M, Ruo-Berchera I 2010 *Nat. Photonics* **4** 227
- [28] Ono T, Okamoto R, Takeuchi S 2013 *Nat. Commun.* **4** 2426
- [29] Samantaray N, Ruo-Berchera I, Meda A, Genovese M 2017 *Light Sci. Appl.* **6** e17005
- [30] Ruo-Berchera I, Meda A, Losero E, Avella A, Samantaray N, Genovese M 2020 *Appl. Phys. Lett.* **116** 214001
- [31] Sabines-Chesterking J, McMillan A R, Moreau P A, Joshi S K, Knauer S, Johnston E, Rarity J G, Matthews J C F 2019 *Opt. Express* **27** 30810
- [32] Ortolano G, Paniate A, Boucher P, Napoli C, Soman S, Pereira S F, Ruo-Berchera I, Genovese M 2023 *Light Sci. Appl.* **12** 171
- [33] Kong L J, Zhang J F, Zhang Z, Zhang X D 2025 *Laser Photonics Rev.* **19** 2401909
- [34] Defienne H, Reichert M, Fleischer J W, Faccio D 2019 *Sci. Adv.* **5** eaax0307
- [35] Yang Q, Liu J W, Shou Y C, Wang Y, Chen S Z, Shu W X, Wen S C, Luo H L 2025 *Nano Lett.* **25** 8407
- [36] Liu J W, Yang Q, Chen S Z, Xiao Z C, Wen S C, Luo H L 2022 *Phys. Rev. Lett.* **128** 193601
- [37] Aspden R S, Gemmill N R, Morris P A, Tasca D S, Mertens L, Tanner M G, Kirkwood R A, Ruggeri A, Tosi A, Boyd R W, Buller G S, Hadfield R H, Padgett M J 2015 *Optica* **2** 1049
- [38] Defienne H, Reichert M, Fleischer J W 2018 *Phys. Rev. Lett.* **121** 233601
- [39] Cameron P, Courme B, Vernière C, Pandya R, Faccio D, Defienne H 2024 *Science* **383** 1142
- [40] Zheng Y, Liu Z D, Tang J S, Xu J S, Li C F, Guo G C 2025 *Light Sci. Appl.* **14** 311
- [41] Walmsley I 2017 *Science* **358** 1001
- [42] Steinberg A M, Kwiat P G, Chiao R Y 1992 *Phys. Rev. Lett.* **68** 2421
- [43] Okano M, Okamoto R, Tanaka A, Ishida S, Nishizawa N, Takeuchi S 2013 *Phys. Rev. A* **88** 043845
- [44] Tsao C, Ling H, Hinkle A, Chen Y, Jha K K, Yan Z L, Utzat H 2025 *Nat. Nanotechnol.* **20** 1001
- [45] Lyons A, Knee G C, Bolduc E, Roger T, Leach J, Gauger E M, Faccio D 2018 *Sci. Adv.* **4** eaap9416
- [46] Sgobba F, Andrisani A, Dello Russo S, Siciliani de Cumis M, Santamaria Amato L 2023 *Sensors* **23** 7758
- [47] Dorfman K E, Asban S, Gu B, Mukamel S 2021 *Commun. Phys.* **4** 49
- [48] Eshun A, Gu B, Varnavski O, Asban S, Dorfman K E, Mukamel S, Goodson III T 2021 *J. Am. Chem. Soc.* **143** 9070
- [49] Liu X H, Li T, Wang J X, Kamble M R, Zheltikov A M, Agarwal G S 2022 *Opt. Express* **30** 47463
- [50] Lyons A, Zickus V, Álvarez-Mendoza R, Triggiani D, Tamma V, Westerberg N, Tassieri M, Faccio D 2023 *Nat. Commun.* **14** 8005
- [51] Ndagano B, Defienne H, Branford D, Shah Y D, Lyons A, Westerberg N, Gauger E M, Faccio D 2022 *Nat. Photonics* **16** 384
- [52] Torre C, McMillan A, Monroy-Ruz J, Matthews J C F 2023 *Phys. Rev. A* **108** 023726
- [53] Wang L J, Zou X Y, Mandel L 1991 *Phys. Rev. A* **44** 4614
- [54] Lemos G B, Borish V, Cole G D, Ramelow S, Lapkiewicz R, Zeilinger A 2014 *Nature* **512** 409
- [55] Lahiri M, Lapkiewicz R, Lemos G B, Zeilinger A 2015 *Phys. Rev. A* **92** 013832
- [56] Pearce E, Gemmill N R, Flórez J, Ding J, Oulton R F, Clark A S, Phillips C C 2023 *Opt. Contin.* **2** 2386
- [57] Kalashnikov D A, Paterova A V, Kulik S P, Krivitsky L A 2016 *Nat. Photonics* **10** 98
- [58] Hashimoto K, Horoshko D B, Kolobov M I, Michael Y, Gefen Z, Chekhova M V 2024 *Commun. Phys.* **7** 217
- [59] Paterova A, Lung S, Kalashnikov D A, Krivitsky L A 2017 *Sci. Rep.* **7** 42608
- [60] Kviatkovsky I, Chrzanowski H M, Avery E G, Bartolomaeus H, Ramelow S 2020 *Sci. Adv.* **6** eabd0264
- [61] Lindner C, Wolf S, Kiessling J, Kühnemann F 2020 *Opt. Express* **28** 4426
- [62] Paterova A V, Krivitsky L A 2020 *Light Sci. Appl.* **9** 82
- [63] Paterova A V, Maniam S M, Yang H, Greci G, Krivitsky L A 2020 *Sci. Adv.* **6** eabd0460
- [64] Vanselow A, Kaufmann P, Zorin I, Heise B, Chrzanowski H M, Ramelow S 2020 *Optica* **7** 1729
- [65] Lindner C, Kunz J, Herr S J, Wolf S, Kiefling J, Kühnemann F 2021 *Opt. Express* **29** 4035
- [66] Kaufmann P, Chrzanowski H M, Vanselow A, Ramelow S 2022 *Opt. Express* **30** 5926
- [67] Kviatkovsky I, Chrzanowski H M, Ramelow S 2022 *Opt. Express* **30** 5916
- [68] Mukai Y, Okamoto R, Takeuchi S 2022 *Opt. Express* **30** 22624
- [69] Paterova A V, Toa Z S D, Yang H, Krivitsky L A 2022 *ACS Photonics* **9** 2151
- [70] Chakraborty T, Produit T, Krishnamoorthy H N S, Soci C,

- Paterova A V 2025 *Opt. Quantum* **3** 119
- [71] Kurita T, Mukai Y, Okamoto R, Arahata M, Tashima T, Ota H, Tokuda K, Takeuchi S 2025 *Phys. Rev. Appl.* **23** 014061
- [72] Zhang X, Zhang Z C, Dong H 2025 *Phys. Rev. Lett.* **134** 243601
- [73] Kutas M, Haase B, Bickert P, Riexinger F, Molter D, von Freymann G 2020 *Sci. Adv.* **6** eaaz8065
- [74] Kutas M, Haase B, Klier J, Molter D, von Freymann G 2021 *Optica* **8** 438
- [75] Hashimoto K, Horoshko D B, Chekhova M V 2025 *Adv. Quantum Technol.* **8** 2300299
- [76] Kutas M, Riexinger F, Klier J, Molter D, von Freymann G 2025 *Adv. Quantum Technol.* **8** e2500271
- [77] Gilaberte Basset M, Hochrainer A, Töpfer S, Riexinger F, Bickert P, León-Torres J R, Steinlechner F, Gräfe M 2021 *Laser Photonics Rev.* **15** 2000327
- [78] Töpfer S, Gilaberte Basset M, Fuenzalida J, Steinlechner F, Torres J P, Gräfe M 2022 *Sci. Adv.* **8** eabl4301
- [79] Pearce E, Wolley O, Mekhail S P, Gregory T, Gemmill N R, Oulton R F, Clark A S, Phillips C C, Padgett M J 2024 *Sci. Rep.* **14** 16008
- [80] León-Torres J R, Krajinić F, Kumar M, Basset M G, Setzpfandt F, Gili V F, Jelenković B, Gräfe M 2024 *Opt. Express* **32** 35449
- [81] Vallés A, Jiménez G, Salazar-Serrano L J, Torres J P 2018 *Phys. Rev. A* **97** 023824
- [82] Machado G J, Frascella G, Torres J P, Chekhova M V 2020 *Appl. Phys. Lett.* **117** 094002
- [83] Töpfer S, Tovar-Perez S, Torres J R L, Derr D, Giese E, Fuenzalida J, Gräfe M 2025 *Opt. Quantum* **3** 129
- [84] Hochrainer A, Lahiri M, Lapkiewicz R, Lemos G B, Zeilinger A 2017 *Optica* **4** 341
- [85] Michael Y, Jonas I, Bello L, Meller M E, Cohen E, Rosenbluh M, Pe'er A 2021 *Phys. Rev. Lett.* **127** 173603
- [86] Viswanathan B, Lemos G B, Lahiri M 2021 *Opt. Express* **29** 38185
- [87] Fuenzalida J, Hochrainer A, Lemos G B, Ortega E A, Lapkiewicz R, Lahiri M, Zeilinger A 2022 *Quantum* **6** 646
- [88] Santos E A, Pertsch T, Setzpfandt F, Saravi S 2022 *Phys. Rev. Lett.* **128** 173601
- [89] Vega A, Santos E A, Fuenzalida J, Gilaberte Basset M, Pertsch T, Gräfe M, Saravi S, Setzpfandt F 2022 *Phys. Rev. Res.* **4** 033252
- [90] Gilaberte Basset M, Sondenheimer R, Fuenzalida J, Vega A, Töpfer S, Santos E A, Saravi S, Setzpfandt F, Steinlechner F, Gräfe M 2023 *Phys. Rev. A* **108** 052610
- [91] Borodin D, Schori A, Zontone F, Shwartz S 2016 *Phys. Rev. A* **94** 013843
- [92] Sofer S, Strizhevsky E, Schori A, Tamasaku K, Shwartz S 2019 *Phys. Rev. X* **9** 031033
- [93] Edamatsu K, Oohata G, Shimizu R, Itoh T 2004 *Nature* **431** 167
- [94] Schori A, Bömer C, Borodin D, Collins S P, Detlefs B, Moretti Sala M, Yudovich S, Shwartz S 2017 *Phys. Rev. Lett.* **119** 253902
- [95] Schlawin F, Dorfman K E, Mukamel S 2018 *Acc. Chem. Res.* **51** 2207
- [96] Villabona-Monsalve J P, Varnavski O, Palfey B A, Goodson III T 2018 *J. Am. Chem. Soc.* **140** 14562
- [97] Varnavski O, Goodson III T 2020 *J. Am. Chem. Soc.* **142** 12966
- [98] Tabakaev D, Montagnese M, Haack G, Bonacina L, Wolf J P, Zbinden H, Thew R T 2021 *Phys. Rev. A* **103** 033701
- [99] Dayan B, Pe'er A, Friesem A A, Silberberg Y 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 043602
- [100] Dickinson T, Afxenti I, Astrauskaite G, Hirsch L, Nerenberg S, Jedrkiewicz O, Faccio D, Müllenbroich C, Gatti A, Clerici M, Caspani L 2025 *Sci. Adv.* **11** eadw4820
- [101] Tabakaev D, Djorović A, La Volpe L, Gaulier G, Ghosh S, Bonacina L, Wolf J P, Zbinden H, Thew R T 2022 *Phys. Rev. Lett.* **129** 183601
- [102] Landes T, Allgaier M, Merkouche S, Smith B J, Marcus A H, Raymer M G 2021 *Phys. Rev. Res.* **3** 033154
- [103] Landes T, Raymer M G, Allgaier M, Merkouche S, Smith B J, Marcus A H 2021 *Opt. Express* **29** 20022
- [104] Corona-Aquino S, Calderón-Losada O, Li-Gómez M Y, Cruz-Ramirez H, Álvarez-Venicio V, Carreón-Castro M del P, de J. León-Montiel R, U'Ren A B 2022 *J. Phys. Chem. A* **126** 2185
- [105] Hickam B P, He M, Harper N, Szoke S, Cushing S K 2022 *J. Phys. Chem. Lett.* **13** 4934
- [106] Mikhaylov A, Wilson R N, Parzuchowski K M, Mazurek M D, Camp C H Jr, Stevens M J, Jimenez R 2022 *J. Phys. Chem. Lett.* **13** 1489
- [107] Qian G W, Liu X, Xu C R, Xu X Q, Wang D W 2024 *Quantum Front.* **3** 5
- [108] Dorfman K E, Schlawin F, Mukamel S 2014 *J. Phys. Chem. Lett.* **5** 2843
- [109] Zhang Z D, Peng T, Nie X Y, Agarwal G S, Scully M O 2022 *Light Sci. Appl.* **11** 274
- [110] Gu B, Sun S C, Chen F, Mukamel S 2023 *Proc. Natl. Acad. Sci.* **120** e2300541120
- [111] Fan J J, Ou Z Y, Zhang Z 2024 *Light Sci. Appl.* **13** 163
- [112] Xu Z C, Nitanaï S, Oguchi K, Ozeki Y 2025 *Appl. Phys. Lett.* **127** 040501
- [113] Schnabel R 2017 *Phys. Rep.* **684** 1
- [114] Lawrie B J, Lett P D, Marino A M, Pooser R C 2019 *ACS Photonics* **6** 1307
- [115] Dufrière Y F, Ando T, Garcia R, Alsteens D, Martinez-Martin D, Engel A, Gerber C, Müller D J 2017 *Nat. Nanotechnol.* **12** 295
- [116] Pavliček N, Gross L 2017 *Nat. Rev. Chem.* **1** 0005
- [117] Treps N, Grosse N, Bowen W P, Fabre C, Bachor H A, Lam P K 2003 *Science* **301** 940
- [118] Taylor M A, Janousek J, Daria V, Knittel J, Hage B, Bachor H A, Bowen W P 2013 *Nat. Photonics* **7** 229
- [119] Taylor M A, Janousek J, Daria V, Knittel J, Hage B, Bachor H A, Bowen W P 2014 *Phys. Rev. X* **4** 011017
- [120] Pooser R C, Lawrie B 2015 *Optica* **2** 393
- [121] Boyer V, Marino A M, Pooser R C, Lett P D 2008 *Science* **321** 544
- [122] Pooser R C, Savino N, Batson E, Beckey J L, Garcia J, Lawrie B J 2020 *Phys. Rev. Lett.* **124** 230504
- [123] Lee C, Lawrie B, Pooser R, Lee K G, Rockstuhl C, Tame M 2021 *Chem. Rev.* **121** 4743
- [124] Pooser R C, Lawrie B 2016 *ACS Photonics* **3** 8
- [125] Fan W, Lawrie B J, Pooser R C 2015 *Phys. Rev. A* **92** 053812
- [126] Kamble M, Humbert E, Li T, Agarwal G S 2025 *PRX Life* **3** 023010
- [127] Dowran M, Kumar A, Lawrie B J, Pooser R C, Marino A M 2018 *Optica* **5** 628
- [128] Dowran M, Win A L, Jain U, Kumar A, Lawrie B J, Pooser R C, Marino A M 2024 *ACS Photonics* **11** 3037
- [129] De Andrade R B, Kerdoncuff H, Berg-Sørensen K, Gehring

- T, Lassen M, Andersen U L 2020 *Optica* **7** 470
- [130] Casacio C A, Madsen L S, Terrasson A, Waleed M, Barnscheidt K, Hage B, Taylor M A, Bowen W P 2021 *Nature* **594** 201
- [131] Dorfman K, Liu S, Lou Y, Wei T, Jing J, Schlawin F, Mukamel S 2021 *Proc. Natl. Acad. Sci.* **118** e2105601118
- [132] Prajapati N, Niu Z, Novikova I 2021 *Opt. Lett.* **46** 1800
- [133] Xu Z C, Oguchi K, Taguchi Y, Takahashi S, Sano Y, Mizuguchi T, Katoh K, Ozeki Y 2022 *Opt. Lett.* **47** 5829
- [134] Xu Z C, Oguchi K, Taguchi Y, Sano Y, Miyawaki Y, Cheon D, Katoh K, Ozeki Y 2022 *Opt. Express* **30** 18589
- [135] Gong L, Lin S, Huang Z 2023 *Opt. Lett.* **48** 6516
- [136] Xu Z C, Oguchi K, Nitanaï S, Taguchi Y, Sano Y, Ozeki Y 2023 *Appl. Phys. Lett.* **123** 024006
- [137] Terrasson A, Mauranyapin N P, Casacio C A, Grim J Q, Barnscheidt K, Hage B, Taylor M A, Bowen W P 2024 *Opt. Express* **32** 36193
- [138] Li T, Li F, Liu X H, Yakovlev V V, Agarwal G S 2022 *Optica* **9** 959
- [139] Li T, Cheburkanov V, Yakovlev V V, Agarwal G S, Scully M O 2024 *Proc. Natl. Acad. Sci.* **121** e2413938121
- [140] Shen Y R, Bloembergen N 1965 *Phys. Rev.* **137** A1787
- [141] Min W, Cheng J X, Ozeki Y 2025 *Nat. Photonics* **19** 803
- [142] Yang F, Bevilacqua C, Hambura S, Neves A, Gopalan A, Watanabe K, Govendir M, Bernabeu M, Ellenberg J, Díz-Muñoz A, Köhler S, Rapti G, Jechlinger M, Prevedel R 2023 *Nat. Methods* **20** 1971
- [143] Shaashoua R, Kasuker L, Kishner M, Levy T, Rotblat B, Ben-Zvi A, Bilenca A 2024 *Nat. Photonics* **18** 836
- [144] Qi Y, Yao S, Du Z X, Zhang J R, Zhou C Y, Fu X H, Li H, Mi T, Chen Y H, Wang Y F, Luo Y, He X Y, Nan J, Zhang Y J, Sun L, Xia P, Cai S Q, Du J L, Xie J J, Chen W B, Yang F 2025 *Nat. Photonics* **19** 879
- [145] Iskhakov T S, Pérez A M, Spasibko K Y, Chekhova M V, Leuchs G 2012 *Opt. Lett.* **37** 1919
- [146] Lindner C, Kunz J, Herr S J, Kiefling J, Wolf S, Kühnemann F 2023 *APL Photonics* **8** 051301
- [147] Cardoso A C, Berruezo L P, Ávila D F, Lemos G B, Pimenta W M, Monken C H, Saldanha P L, Pádua S 2018 *Phys. Rev. A* **97** 033827
- [148] Xue G T, Niu Y F, Liu X Y, Duan J C, Chen W J, Pan Y, Jia K P, Wang X H, Liu H Y, Zhang Y, Xu P, Zhao G, Cai X L, Gong Y X, Hu X P, Xie Z D, Zhu S N 2021 *Phys. Rev. Appl.* **15** 064059
- [149] Wayne M, Ulku A, Ardelean A, Mos P, Bruschini C, Charbon E 2022 *IEEE Trans. Electron Devices* **69** 2865
- [150] Resta G V, Stasi L, Perrenoud M, El-Khoury S, Brydges T, Thew R, Zbinden H, Bussi eres F 2023 *Nano Lett.* **23** 6018
- [151] Gebhart V, Santagati R, Gentile A A, Gauger E M, Craig D, Ares N, Banchi L, Marquardt F, Pezz e L, Bonato C 2023 *Nat. Rev. Phys.* **5** 141
- [152] Kudyshev Z A, Sychev D, Martin Z, Yesilyurt O, Bogdanov S I, Xu X, Chen P G, Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaev V M 2023 *Nat. Commun.* **14** 4828
- [153] Vahlbruch H, Mehmet M, Danzmann K, Schnabel R 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 110801
- [154] Liu S S, Lou Y B, Jing J T 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 113602
- [155] Jia W, Xu V, Kuns K, Nakano M, Barsotti L, Evans M, Mavalvala N, members of the LIGO Scientific Collaboration 2024 *Science* **385** 1318
- [156] Gao L, Zheng L, Lu B, Shi S, Tian L, Zheng Y 2024 *Light Sci. Appl.* **13** 294
- [157] Matekole E S, CuoZZo S L, Prajapati N, Bhusal N, Lee H, Novikova I, Mikhailov E E, Dowling J P, Cohen L 2020 *Phys. Rev. Lett.* **125** 113602

SPECIAL TOPIC—Principles and applications of quantum optics

Spectroscopy and imaging with quantum light^{*}

FU Pengcheng^{1) #} ZHANG Yanzhi^{1) #} XU Xingqi²⁾ LIU Xu¹⁾
HU Huizhu¹⁾ CAI Han^{1) †}

1) (*State Key Laboratory of Extreme Photonics and Instrumentation, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

2) (*Zhejiang Key Laboratory of Micro-Nano Quantum Chips, School of Physics, Hangzhou 310027, China*)

(Received 7 November 2025; revised manuscript received 25 February 2026)

Abstract

Advances in spectroscopic measurement and imaging technologies have become key tools in life sciences and materials science. However, for samples with weak optical responses, such as low-dimensional materials and living cells, high-power excitation light often introduces significant classical noise and causes non-negligible photodamage, thereby limiting the achievable signal-to-noise ratio (SNR) and the application scope. In this context, nonclassical light sources with unique quantum properties, such as entangled light and squeezed light, provide a promising route to surpass classical limits in SNR. This review focuses on the field of quantum-enhanced spectroscopy and imaging, and systematically reviews recent progress based on two important types of quantum light sources: entangled light and squeezed light. Owing to quantum correlations between photons, entangled light exhibits remarkable robustness against noise in applications such as correlation imaging, undetected-photon imaging, and ultrafast interferometric measurements. In contrast, squeezed light improves detection sensitivity and SNR by reducing quantum noise in the optical field, enabling enhanced performance in displacement sensing, plasmonic detection, and nonlinear microscopic imaging. Furthermore, this article systematically discusses the unique advantages of quantum light sources in improving SNR, reducing photodamage, enhancing temporal resolution, and increasing nonlinear conversion efficiency. It also analyzes key challenges that currently limit the practical implementation of quantum imaging technologies, including the low brightness of quantum light sources and large system losses. Finally, we discuss the future directions in this field.

Keywords: quantum precision measurement, quantum imaging, entangled light, squeezed light

DOI: [10.7498/aps.75.20251515](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251515)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251515](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251515)

^{*} Project supported by the Innovation Program for Quantum Science and Technology (Grant No. 2024ZD0302200), the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2024YFA1408900), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12404573, 12434020, 12325412, 12374335, U21A20437, 11934011), the Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China (Grant Nos. LZ24A040001, LR25A040002), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. 024FZZX02-01-02), and the “Pioneer” and “Leading Goose” R&D Program of Zhejiang Province, China (Grant No. 2025C01028).

[#] These authors contributed equally.

[†] Corresponding author. E-mail: hancai@zju.edu.cn



基于量子光源的光谱与成像

傅鹏程 张彦之 徐兴奇 刘旭 胡慧珠 蔡晗

Spectroscopy and imaging with quantum light

FU Pengcheng ZHANG Yanzhi XU Xingqi LIU Xu HU Huizhu CAI Han

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 100601 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251515

CSTR: 32037.14.aps.75.20251515

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251515>

当期内容 View table of contents: <https://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于线性与非线性干涉仪的量子精密测量研究进展

Research progress in quantum precision measurements based on linear and nonlinear interferometers

物理学报. 2022, 71(13): 130701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220425>

量子信息科技的发展现状与展望

Quantum information technology: Current status and prospects

物理学报. 2024, 73(1): 010301 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231795>

非临界压缩光场探测的实验方案研究

Experimental scheme of non-critical squeezed light field detection

物理学报. 2022, 71(1): 010301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211212>

9.1 dB HG_{10} 模压缩态光场的实验制备

Experimental generation of 9.1 dB HG_{10} mode squeezed light

物理学报. 2025, 74(22): 224202 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20251109>

基于铌酸锂波导的中红外纯态量子光源

Mid-infrared pure-state quantum light source based on lithium niobate waveguides

物理学报. 2026, 75(4): 224202 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251398>

基于压缩态光场的量子增强型光学相位追踪

Quantum-enhanced optical phase tracking via squeezed state

物理学报. 2024, 73(5): 054203 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231835>