Acta Physica Sinica

超构表面赋能量子光学：迈向应用新时代 *

刘星雨　贺涓子　冯晓静　王漱明 †

南京大学物理学院固体微结构物理国家重点实验室，江苏南京　210093

量子信息技术因其并行计算潜力和信息安全优势，成为信息科学的重要研究方向。光量子信息技术走向规模化与实用化，依赖于实现多种物理功能综合集成的新型光量子器件。超构表面拥有在亚波长尺度下精确塑造光场的能力，具有多功能、易于集成、轻薄和紧凑的优势，为构建小型量子光学平台及研制集成光量子器件提供了重要的技术支撑。在此背景下，超构表面正为光量子信息技术注入新的发展动力，加速其进入高效应用的新时代。本文系统梳理了超构表面在量子光源制备、量子态操控与测量以及典型量子光学应用中的研究进展，并对其未来发展趋势与关键挑战进行了总结与展望。

关键词：量子光学，超构表面，量子光源，量子态

PACS: 42.50.-p, 78.67.Pt, 42.50.Dv

1 引　言

量子信息技术被视为继经典信息技术之后的下一代信息处理范式，具有指数级计算加速潜力和安全通信优势，近年来在量子通信 [1]、量子计算 [2,3] 与量子精密测量 [4,5] 等方面取得了显著进展。该领域的基本信息处理单元被称为量子比特，而作为量子比特的重要物理实现体系，光子因其长相干时间以及多自由度编码能力，被广泛认为是理想的量子信息载体 [6–8]。然而，现有的光量子信息系统多依赖于体积庞大的自

† 通信作者. E-mail: wangshuming@nju.edu.cn　(通信作者)
第一作者. E-mail: 652024220029@smail.nju.edu.cn　(第一作者)

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号：2024YFB3815900, 2022YFA1404300)、国家自然科学基金 (批准号：62405140, 62505131)、中国科学院瞬态光学与光子技术国家重点实验室开放研究基金 (批准号：SKLST202218)、中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号：020414380175) 和江苏省自然科学基金 (批准号：BK20240642) 资助的课题.

录用稿件，非最终出版稿

由空间光学元件及复杂的光路结构，在系统稳定性与规模扩展方面面临一定限制。随着光量子信息技术研究的深入，实现光量子信息功能的集成化和芯片化，已成为推动光量子信息技术规模化拓展以及在实际环境中应用的关键技术瓶颈。

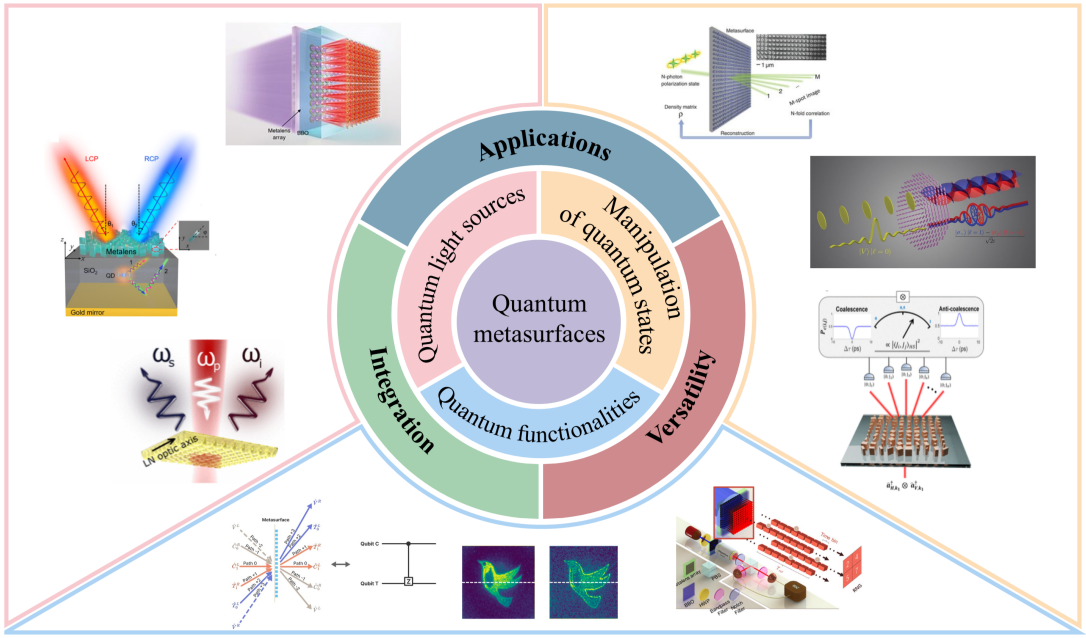


图 1　超构表面在量子光学中的应用。图中展示了超构表面在量子光源制备 [9–11]、量子态操控与测量 [12–14]，以及典型量子光学应用场景 [15–17] 中的研究进展和代表性成果。

Fig. 1. Applications of metasurfaces in quantum optics. The figure illustrates the research progress and representative achievements of metasurfaces in quantum light source preparation [9–11], quantum state manipulation and measurement [12–14], and in typical quantum optical application scenarios [15–17].

随着纳米技术和微纳加工技术的发展，实现精确的电磁波波前调控已成为可能，超构表面也随之应运而生 [18]。超构表面由人工纳米结构组成 [19–22]，通过精确设计其几何参数、空间排布和取向，基于传输相位、共振相位和几何相位 [23,24]（Pancharatnam–Berry 相位）等设计原理，可以在亚波长尺度上实现对光场振幅、相位和偏振等多自由度的灵活调控，具有轻薄、紧凑、易于集成的优势。这些特性使得超构表面在光学设计中具备独特潜力，打破了传统光学元件的技术局限，能够实现广义折射 [18]、全息成像 [25,26]、结构色打印 [27] 以及消色差透镜 [28–30] 等多种光学功能，在成像 [31,32]、通信 [33]、传感 [34] 等多个领域逐步走向实际应用。此外，超构表面可基于金属等离激元 [35] 或介质米氏共振 [36] 实现光场局域增强和高效率光学响应，为光–物质相互作用的精确调控提供了前所未有的平台。

录用稿件，非最终出版稿

得益于在经典光场调控中展现出的卓越性能，超构表面逐渐被应用到量子光学领域，为量子光学平台的小型化、高效率调控以及多功能集成提供了新的实现路径，并为光量子信息技术向规模化应用发展奠定了重要基础。在本文中，如图 1 所示，我们首先介绍超构表面在量子光源制备 [9,10,37] 方面的研究进展，随后重点讨论其在量子态操控与测量 [12–14,38–40] 领域的重要研究工作。在此基础上，总结其在量子成像 [15,41,42]、量子通信 [43]、量子计算 [16,17] 与量子传感 [44] 等典型应用场景中的代表性成果，并对未来超构表面在光量子信息技术中的应用进行了展望。

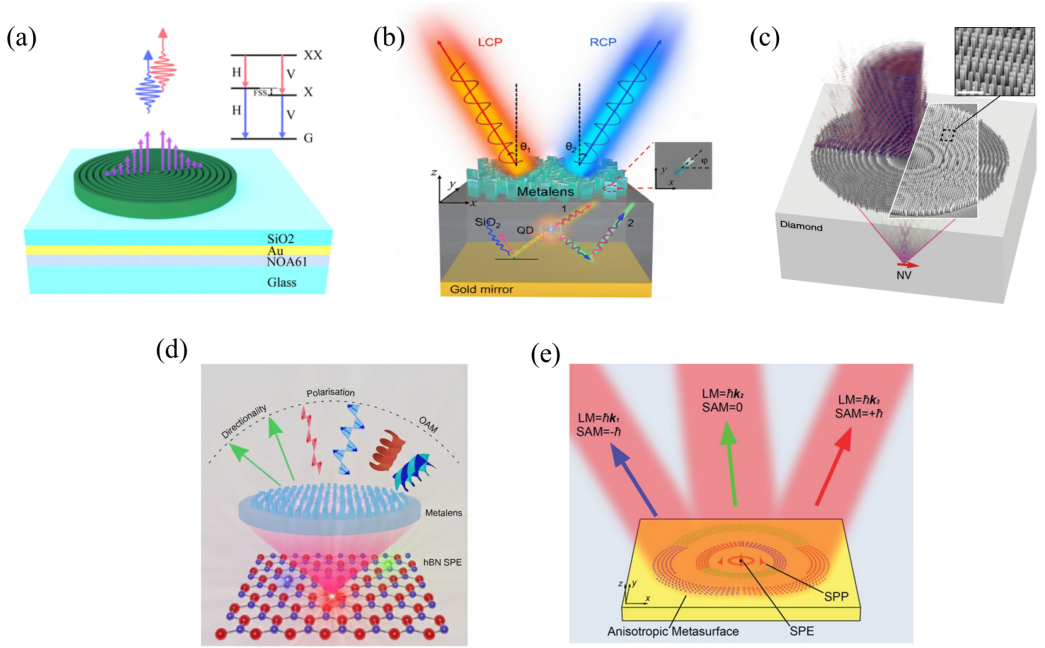


图 2　基于超构表面的单光子源。(a) CBR-HBR 与量子点结合产生纠缠光子对 [45]；(b) 自旋按需调控的双焦点超构透镜量子点辐射 [10]；(c) 超构透镜对单 NV 色心单光子源的辐射调控 [46]；(d) 超构表面赋能的多自由度单光子发射调控 [47]；(e) 超构表面实现 SAM 与 LM 独立可调的多通道单光子发射器 [48]。

Fig. 2. Metasurface-based quantum light sources. (a) Entangled photon-pair generation by coupling CBR–HBR with quantum dots [45]; (b) bifocal metalens for spin-state splitting and enhancement of single-photon emission [10]; (c) monolithic immersion metalens for enhancing single-photon collection and collimation of an NV center [46]; (d) metasurface-enabled structuring of single-photon emission in multiple degrees of freedom [47]; (e) multichannel single-photon emitters with free control of independent SAMs and LMs [48].

录用稿件，非最终出版

2 量子光源

量子光源是光量子信息技术体系中的核心单元，理想的量子光源不仅需要具备高亮度和高效率的特征，还应满足小型化、可集成、可调控以及高稳定性等关键要求，以适应未来大规模光量子信息处理平台的发展趋势 [49–51]。超构表面可以实现光场局域增强和高效率光学响应，从而提升量子光源的亮度和发光效率。同时，超构表面具有卓越的光场调控性能，可以实现物理功能的综合集成 [52–55]。因此，基于超构表面的量子光源为实现高效率和集成化的光量子器件提供了新的实现思路，目前已经在单光子源、纠缠光子对源以及高维多光子量子源等方向取得了一系列研究进展。

2.1 单光子源

目前最主要的单光子源是量子发光体，常见的量子发光体有染料分子、量子点以及晶体中的色心结构等。在这些量子发光体中，量子点波长明确、发射确定性高，而且制备工艺相对简单、易于集成，对外界温度要求较低，是具有优势和潜力的单光子源 [56–59]。然而，量子点的辐射亮度和效率通常受限于材料折射率与外界环境的失配，这限制了其在光通信和光信号处理中的应用。超构表面技术在提升量子点光源的发射效率和收集效率，同时保持其量子特性方面，发挥了重要作用 [60]。

为了实现量子点单光子源的增强，Liu 等 [45] 设计了一种高效宽带反射器上的环形布拉格谐振器。如图 2(a) 所示，该结构位于 SiO_2 层上，由一个圆形 AlGaAs 盘和一组同心的 AlGaAs 环组成，SiO_2 层下面是一层金衬底作为反射层。通过宽场量子点精准定位技术，GaAs 量子点被精确地放置在腔中心以产生纠缠光子对。调节中心 AlGaAs 圆盘直径可精确控制空腔共振，面内辐射由满足二阶布拉格条件的同心环向上引导，通过精心设计 SiO_2 绝缘层厚度，侧向和背向泄漏的光子可被宽带金镜反射并重新捕获，从而显著提高量子点的辐射效率和亮度。Bao 等 [10] 提出了一种将量子点与精心设计的超构透镜集成的方法，构成一个新的量子光源。如图 2(b) 所示，通过将量子点与其镜像的辐射光子置于双焦超构透镜两个焦点位置，利用超构透镜的各向异性纳米结构控制几何相位，实现单光子偏振态的分离与辐射方向的精确控制。类似地，Huang 等 [46] 提出了一种基于金刚石的超构透镜设计。如图 2(c) 所示，通过在金刚石表面精确刻蚀亚波长纳米柱，构建了高数值孔径的超构透镜。该结构能够精准对准金刚石内部的 NV 色心，并将其发射的光子直接准直并耦合至光纤中，其光子收集效率可达 92%。

轨道角动量 (OAM) 作为光子的重要物理自由度，因其具有理论上无限维的希尔伯特空间，已成为实现高维量子信息处理的关键载体。与传统的二能级极化态相比，基于轨道角动量编码的量子态能够显著提

录用稿件，非最终出版稿

升单光子的信息携带容量，在增强量子通信安全性及提高量子逻辑门效率方面展现出巨大的潜力。近年来，单光子发射可调控的自由度进一步扩展至轨道角动量。为了进一步提升量子光源的系统集成度与光场操控能力，Li 等 [47] 将 hBN 发射的单光子流耦合到超构表面上，不仅实现了正交偏振态的定向分束，还通过叠加梯度相位和螺旋相位，成功在不同偏振通道上编码了具有特定拓扑荷的轨道角动量模式。如图 2(d) 所示，这种平面集成策略实现了对单光子源空间波前、偏振及轨道角动量等多个物理自由度的同步精确操纵，验证了超构表面对量子发射的调控能力。

更进一步地，Jia 等 [48] 提出了一种利用各向异性超构表面实现单光子多通道按需发射的新方法。与仅依赖相位控制、且需要精确定位量子发射体的传统超构表面不同，这种设计结合了相位无关控制与相位依赖控制，实现单光子的自旋角动量 (SAM) 与动量 (LM) 的独立调控，如图 2(e) 所示。其中，自旋角动量的相位无关控制通过设计各向异性纳米散射体的内部结构实现，而纳米散射体的相位依赖排列则决定了光子的发射方向。相位无关控制允许量子发射体与超构表面之间的鲁棒性对准，而各向异性设计修正了倾斜发射的几何相位，从而提供了更大的线动量调控范围（可达 53°）。这一方案克服了传统相位调控对加工精度的严苛限制，在量子通信 [61,62] 的动量复用和空间复用领域具有重要的应用前景，也为实现高维集成量子芯片提供了关键的微纳光学元件基础。

上述研究表明，超构表面不仅能够改善单个量子发射体的近场光学环境，还可以进一步调控其远场辐射方向、偏振态和空间模式，为构建高集成度、可设计的单光子源提供了有效途径。在此基础上，相位无关控制等设计思路进一步降低了单光子发射调控对发射体空间对准精度的依赖，在一定程度上提高了器件的鲁棒性。然而，面向高亮度、高纯度和可扩展集成的实际应用，发射体位置分布、光谱漂移以及局域环境扰动仍可能影响器件性能。未来可通过原位加工与容差优化设计进一步提升器件鲁棒性，推动超构表面单光子源向高效率、多自由度和可扩展集成方向发展。

2.2 基于 SPDC 的纠缠光子对

自发参量下转换（SPDC）是产生纠缠光子对最常用的非线性光学过程。在该过程中，泵浦光子通过具有二阶非线性系数 $\chi^{(2)}$ 的晶体时，有一定概率自发分裂为一对信号光子和闲置光子。这一非线性频率转换过程必须严格遵循能量守恒与动量守恒（即相位匹配条件）：

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i \tag{1}$$

$$\vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_i \tag{2}$$

录用稿件，非最终出版稿

其中，ω 和 $\vec{k}$ 分别代表光子的角频率与波矢，下标 p、s 和 i 分别对应泵浦光、信号光和闲置光。由于这些物理约束，产生的双光子在空间路径、频率及发射时间上表现出高度的量子相关性。

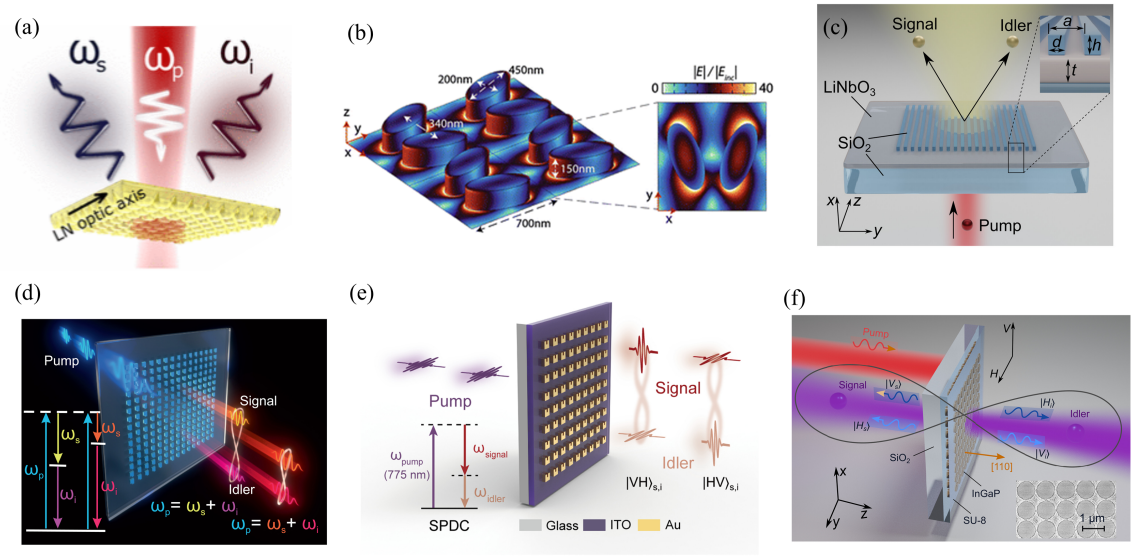


图 3　基于超构表面的 SPDC 纠缠光子对源与调控。(a) 基于铌酸锂（LN）超构表面类 Mie 共振增强的 SPDC 纠缠光子对产生 [9]；(b) GaP 超构表面实现高品质因子增强及光子对定向发射 [63]；(c) 基于非局域导模共振提高光子对光谱亮度 [64]；(d) GaAs 超构表面实现 SPDC 光谱调控与多自由度量子态工程 [37]；(e) 基于 ITO 薄膜与超构表面强耦合结构，实现偏振纠缠光子对的直接产生与调控 [65]；(f) 基于 InGaP 非对称超构表面实现从部分纠缠态到 Bell 态的连续调控 [66]。

Fig. 3. Metasurface-based SPDC entangled photon-pair sources. (a) Mie-resonance-enhanced SPDC generation in a lithium niobate (LN) metasurface [9]; (b) GaP metasurface enabling high-Q enhancement and directional emission of photon pairs [63]; (c) nonlocal guided-mode resonance for enhancing the spectral brightness of photon pairs [64]; (d) GaAs metasurface for SPDC spectral control and multi-degree-of-freedom quantum state engineering [37]; (e) strong coupling between ITO film and metasurface for direct generation and control of polarization-entangled photon pairs [65]; (f) asymmetric InGaP metasurface enabling continuous tuning from partially entangled states to Bell states [66].

在评价体块 SPDC 光源的性能时，不可区分性、收集效率以及光源亮度是三个最重要的核心参数 [67]。然而，传统体块光源通常需要体积庞大的非线性晶体以保证足够的相互作用长度，这不仅增加了光路对准

录用稿件，非最终出版稿

的复杂度，还限制了光子的产生率与收集效率。

相比之下，基于超构表面的 SPDC 光源可以实现亚波长尺度的光场调控，为克服上述瓶颈提供了新途径。在收集效率方面，超构表面可以通过特殊设计的微纳结构精准控制输出光的波前与空间模式，从而显著提升与后续光纤或光学系统的耦合效率；在光源亮度方面，通过引入高品质因子的共振模式，超构表面能将光场极大地局域在非线性介质内部，通过增强局部态密度来补偿体积减小带来的增益损失，从而在极小的物理尺寸下实现更高的光源亮度与辐射增强 [68–71]。

如图 3(a) 所示，Santiago-Cruz 等 [9] 利用铌酸锂（LN）超构表面的类 Mie 共振来增强自发参量下转换（SPDC）过程，其在共振波长附近的双光子产生率比相同厚度的未加工 LN 薄膜提高了两个数量级。此外，通过调节简并波长与电共振波长之间的失谐量，还可以进一步调控 SPDC 过程的光谱带宽。Son 等 [63] 设计了一种支持准连续谱束缚态（quasi-BIC）共振的 GaP 超构表面，如图 3(b) 所示，通过打破结构单元的对称性，实现了对准 BIC 模式的受控耦合，从而在特定波长产生极高的品质因子。在准 BIC 共振波长处，产生的光子对表现出独特的分离行为，共振峰内的信号光子向后发射，位于共振峰之外的信号光子向前和向后发射的概率基本相等。实验测得约 56% 的光子对呈现双向发射特性，从而可通过纳米级的光谱失谐实现路径复用分离。

不同于上述的局域共振，利用非局域导模共振可显著提高发射光子对的光谱亮度。如图 3(c) 所示，Zhang 等 [64] 在 LN 薄膜上方覆盖了一层二氧化硅（SiO_2）纳米光栅，这种设计引入了非局域共振，即准导模共振。通过调节光栅参数，使信号光和闲置光处于高品质因子的共振模式中。这种共振极大地增强了光与物质的相互作用，克服了超薄材料非线性转化效率低的难题。相比于未加工的同厚度 LN 薄膜，该超构表面将光子对的产生速率提升了约 450 倍。

超构表面不仅可以促进 SPDC 过程，还能调控 SPDC 光谱。如图 3(d) 所示，Santiago-Cruz 等 [37] 采用 GaAs 纳米结构阵列组成的超构表面，通过设计纳米结构微小的几何不对称性，产生极高品质因子的共振，从而极大地增强了超构表面内部的电磁场。超构表面可以设计多个共振峰，通过改变泵浦光的波长或调整超构表面的几何参数，可以大范围调谐产生的光子对频率，从而构建复杂的量子态。这表明超构表面可以实现复杂量子态工程，为片上量子光源提供了一种全新的平台。

纠缠光子对的偏振态直接由非线性媒质的二阶非线性极化率张量决定，而这一特性作为材料的固有属性，难以进行有效的人为调控。为了使 SPDC 过程直接生成偏振纠缠光子对，Jia 等 [65] 提出了一种利用由氧化铟锡（ITO）薄膜与超构表面组成的强耦合结构，如图 3(e) 所示。通过人为设计材料的等效二阶非

录用稿件，非最终出版稿

线性极化率张量，可以对纠缠光子对的偏振状态进行灵活调控，从而制备出偏振纠缠 Bell 态，实验测得态保真度为 91%。与此同时，利用 ITO 薄膜在介电常数近零条件下产生的电场增强效应，并结合 SPDC 过程中针对泵浦光波长的谐振结构设计，可显著提高偏振纠缠光子对的产生效率。

虽然 Bell 态在现有的量子通信协议中已被广泛应用，但在贝尔不等式验证、量子隐形传态以及量子密钥分发等关键领域中，部分纠缠态同样具有重要的作用 [72–74]。Ma 等 [66] 设计了一种共振型半导体超构表面，嵌入了 [110] 取向的铟镓磷（InGaP）纳米结构，该结构引入的非对称性破坏了非线性极化过程中的旋转对称性，如图 3(f) 所示。进一步地，通过调节双光子的波长，可有效控制结构中的非对称程度，进而动态调制非对称二次谐波产生（SHG）过程。这种结构通过操控非对称非线性响应来生成可光学调控的双光子量子纠缠，实现了从部分纠缠态到 Bell 态的偏振纠缠态的连续可调，展现了按需生成偏振纠缠态的巨大潜力。

表 1　图 3 所示 SPDC 光子对源的光子对产生率比较

Table 1. Comparison of the photon-pair generation rates of the SPDC photon-pair sources illustrated in Figure 3.

References	Nonlinear Material	Photon-pair wavelength [nm]	Rate / [mHz · mW^{-1}]	Enhancement
[9]	LN	1576	77	130
[63]	GaP	1188	3.4	67
[64]	LN	1570	21	450
[37]	GaAs	1446.8	8	10^3
[65]	ITO	1550	5.4	–
[66]	InGaP	1550	100	25

通过表 1 对图 3 所示的光子对光源在工作机理及性能差异的对比分析可知，超构表面能够有效提升光子对光源的性能，为量子信息处理带来前所未有的机遇。但是由于超构表面的物理厚度远小于传统体块非线性晶体，其非线性相互作用长度仍然有限；与此同时，共振增强机制也会带来对结构尺寸、泵浦波长和实验条件的较高敏感性。因此，后续研究可围绕低损耗材料、多模共振协同设计以及准相位匹配机制等方向展开，在保持器件紧凑性的同时进一步提升光子对亮度、收集效率和工作稳定性。

录用稿件，非最终出版稿

2.3 高维多光子量子源

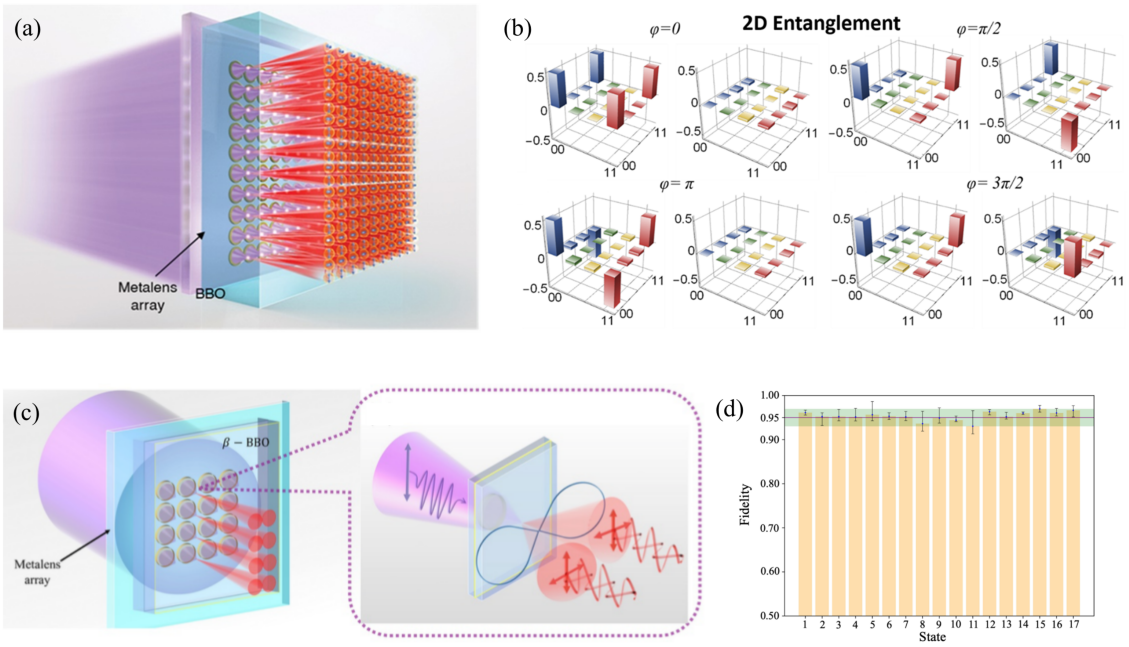


图 4　基于超构表面的高维、多光子纠缠源。(a) 基于超构透镜阵列的高维量子源；(b) 4 种 Bell 态的密度矩阵 [11]；(c) 超纠缠光源的产生过程示意图；(d) 四维单光子远程态的实验保真度 [75]。

Fig. 4. High-dimensional multiphoton entanglement source based on metasurface. (a) High-dimensional quantum source based on metalens array; (b) density matrices of four Bell states [11]; (c) schematic diagram of the generation process of hyper-entangled light sources; (d) experimental fidelity of four-dimensional single-photon remote state preparation [75].

在量子信息技术中，高维量子纠缠光源是实现高容量、高安全性和高鲁棒性量子信息处理的重要基础资源。高维纠缠态具有更高的信息熵和更强的误码容忍能力，使得基于其构建的量子密钥分发协议在面对噪声和窃听攻击时具有更高的安全性 [76,77]。与此同时，高维纠缠还能够支持更复杂的量子信息处理任务，例如高维量子计算、量子模拟以及量子机器学习等。

近几年，为了突破量子光源在纠缠维度和光子数方面的限制，研究者借助超构表面实现了紧凑型的超高维量子纠缠源和多光子源。Li 等 [11] 将超构透镜与非线性光学晶体 BBO 组合在一起，构成全新的超构表面量子光源系统。泵浦激光入射到 10×10 的超构透镜阵列，在 BBO 晶体中聚焦并形成了 10×10 的焦点阵列；每个焦点在 BBO 中触发自发参量下转换过程，由于路径不可区分，得到大规模的纠缠光子对，理论上这一结构制备出的路径纠缠光子的维度为 100，如图 4(a) 所示。如果增加透镜阵列数，纠缠光子的

录用稿件，非最终出版稿

维度还可以进一步提高。与此同时，研究团队通过对超构透镜进行相位设计，对所制备的量子纠缠态实现了精细的相位编码，并通过实验重构了四种设计的 Bell 态的密度矩阵（图 4(b)）。这意味着超构透镜凭借着灵活的光场调控能力，可以对光场的相位、偏振、振幅等集成调控，从而制备所需的量子态。研究团队还表征了更高维度的量子纠缠态，证明了由该系统制备的四维和六维路径纠缠态的保真度达到 96.6% 和 95.0% ，显示了很好的多光子特性。

更进一步地，同一研究团队设计了一种结合超构透镜阵列与三明治型非线性晶体结构的高维路径-偏振超纠缠光源 [75]，实验验证了四维、六维和八维等高维超纠缠态保真度分别可以达到 0.943、0.933 和 0.911。如图 4(c) 所示，超构透镜阵列将泵浦光均匀聚焦至晶体，实现路径编码，并在两片晶体间插入零阶半波片以引入偏振纠缠。同时，通过铌酸锂晶体补偿输出臂中的空间走离，从而增强光子的相干性。基于这种新型光源，研究团队实现了三维至八维单光子态的远程制备，图 4(d) 展现了其中 17 个四维态平均保真度为 0.950±0.0197（最高 0.977），展现了这种新型量子纠缠光源在量子信息技术中广阔的应用前景。

总体来看，超构表面为高维多光子量子源提供了不同于传统体块光学系统的实现思路。借助阵列化设计和相位调控，超构表面不仅能够简化原本复杂的光路结构，还可以在光源产生过程中同步完成路径、偏振等自由度的编码。然而，随着纠缠维度和通道数的增加，高维多光子量子源的性能不再仅由光源亮度决定，而是更加依赖多通道之间的幅度均衡、相位设计的加工精度和光子路径不可区分性。若不同焦点或路径通道的泵浦强度、收集效率和传播相位存在差异，就会改变各路径态的概率幅和相干叠加关系，从而降低高维纠缠态的保真度。与此同时，相邻通道之间的模式串扰、晶体中的空间走离也会进一步增加高维态制备和表征的难度。因此，后续研究除了继续扩展纠缠维度之外，还需要进一步优化阵列结构设计，提高相位设计的加工与实现精度，并抑制通道串扰和路径可区分性带来的影响，从而实现更高质量的高维纠缠态和超纠缠态制备。

3 量子态测量与操控

在量子信息技术中，量子态既是信息的载体，也是信息处理的基本对象。通过对量子态的精确操控，可以实现量子纠缠的生成与调控、量子逻辑门操作 [78,79] 以及复杂量子算法的执行，从而完成经典计算难以实现的信息处理任务。同时，对量子态的测量是获取量子信息和验证量子系统状态的关键步骤 [80–82]，不仅决定了量子计算结果的读取精度，也在量子隐形传态、量子密钥分发等量子通信协议中发挥着至关重要的作用。随着量子信息技术向大规模、集成化方向发展，发展高精度、低损耗且可扩展的量子态操控与测

录用稿件，非最终出版稿

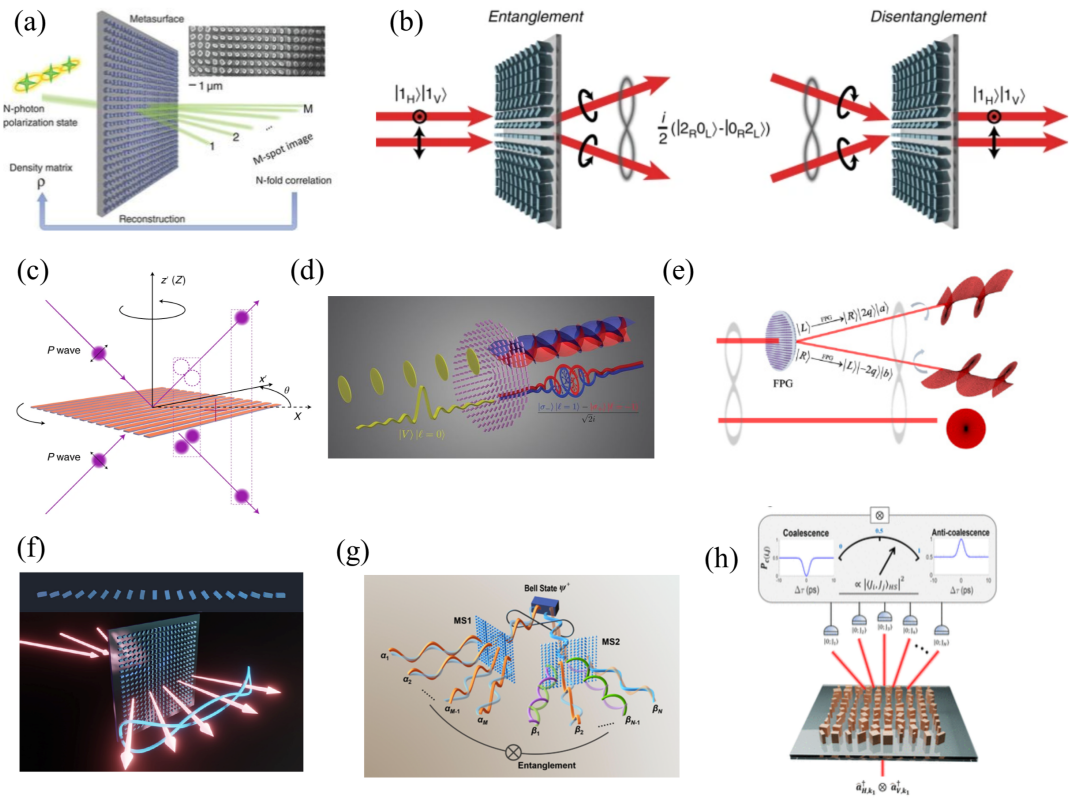


图 5　基于超构表面的量子态测量与操控。(a) 基于多个交错超构光栅构成的介质超构表面，实现多光子偏振量子态测量 [12]；(b) 利用几何相位超构表面实现的双光子纠缠与解纠缠 [44]；(c) 光子对的聚束、反聚束及中间态的产生 [83]；(d) 超构表面引发的光子自旋角动量与 OAM 之间的量子纠缠 [13]；(e) 利用几何相位超构表面产生自旋-轨道相互作用高维纠缠 [84]；(f) 利用单一相位梯度超构表面实现多光子纠缠 [85]；(g) 通过两个 GSI 超构表面实现纠缠分发与变换 [86]；(h) 基于超构表面和图论的广义量子干涉 [14]。

Fig. 5. Manipulation and measurement of quantum states assisted by metasurfaces. (a) Multiphoton polarization quantum state measurement using dielectric metasurface composed of multiple interleaved metagratings [12]; (b) two-photon entanglement and disentanglement realized by geometric phase metasurfaces [44]; (c) generation of bunching, antibunching, and intermediate states of photon pairs [83]; (d) quantum entanglement between photonic spin and orbital angular momentum induced by metasurfaces [13]; (e) generation of high-dimensional entanglement through the geometric phase metasurface-induced spin–orbital interaction [84]; (f) multiphoton path-polarization entanglement through a single gradient metasurface [85]; (g) entanglement distribution and transformation via two GSI metasurfaces [86]; (h) generalized quantum interference based on metasurfaces and graph theory [14].

录用稿件，非最终出版稿

量方法，对推动实用化量子信息处理平台的构建具有重要意义。

Wang 等 [12] 通过集成多个超构光栅，实现多光子干涉过程与多光子量子态的测量。如图 5(a) 所示，通过将输入的多光子态映射至特定的空间衍射级次，所设计的超构表面能够在极小的空间内并行完成复杂的量子干涉过程。更重要的是，超构表面能并行地将多光子偏振态展开到完备的偏振层析态上，通过探测不同衍射路径下的光子符合计数，可以实现多光子态的精准重建。Georgi 等 [44] 利用几何相位超构表面实现双光子纠缠与解纠缠。如图 5(b) 所示，当一对正交偏振的线偏振光子 $|1_H\rangle|1_V\rangle$ 入射到这个超构表面时，两个光子会被分解为左旋或者右旋圆偏振分量，并构成路径纠缠的双光子 NOON 态，其量子态可以写为 $\frac{i}{2}\left(|2_R0_L\rangle - |0_R2_L\rangle\right)$ 。随后，当该纠缠态再次通过相同的超构表面时，由于线性光学变换的幺正性，该 NOON 态可被重新转换为 $|1_H\rangle|1_V\rangle$ 的非纠缠态，从而实现纠缠与解纠缠的可逆操作。

双光子干涉是量子信息处理的核心操作 [87,88]。由于光子的玻色子本性以及传统幺正光学元件受限的相位响应，光子间的有效相互作用被从根本上限制在聚束行为，这限制了光子之间的逻辑操作。Li 等 [83] 提出一种基于非幺正超构表面的两光子量子干涉调控方法。如图 5(c) 所示，该器件通过各向异性的相位响应和偏振相关损耗引入新的量子干涉自由度，使两条双光子路径的概率振幅能够发生可调的相长干涉或相消干涉。当两光子输出路径的振幅相长干涉时，系统表现出典型的玻色聚束效应；而当两光子共同输出路径的振幅相消干涉时，则出现类似费米子的反聚束行为。通过调控超构表面的响应参数，实验实现了从玻色聚束到费米反聚束的连续可调，超越了它们固有的玻色子本性，为量子逻辑门等器件和系统的设计提供了新的思路。

量子纠缠不仅存在于 SPDC 生成的光子对之间，也存在于单个光子的自由度之间。借助光子不同自由度之间的纠缠，能够有效扩展量子态的希尔伯特空间维度，从而在不增加光子数的情况下显著提升信息容量。Stav 等 [13] 通过超构表面实现了光子自旋与轨道角动量的纠缠，如图 5(d) 所示。基于几何相位原理，当圆偏振光通过该结构时，不同自旋态的光子会获得相反符号的相位调制。当 SPDC 产生的一个水平（H）偏振光子入射到超构表面时，其偏振态可以表示为左旋与右旋圆偏振态的叠加。经过超构表面后，左旋和右旋偏振分量分别被转换为具有不同拓扑荷的涡旋光束。具有零 OAM 的水平（H）偏振光可以描述为 $|H\rangle|l=0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\sigma^+\rangle + |\sigma^-\rangle\right)|l=0\rangle$，光子态经过超构表面后变为 $\frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\sigma^+\rangle|l=-\Delta l\rangle + |\sigma^-\rangle|l=\Delta l\rangle\right)$ ，因此输出光子不再是简单的偏振叠加，而是形成偏振与轨道角动量不可分离的量子态，即 SAM–OAM 纠缠态。实验中，更进一步地贝尔态测量结果表明，一个光子的自旋与另一个光子的轨道角动量之间也实现了纠缠。基于这项研究，Li 等 [84] 提出了一种改进的几何相位超构表面，用于生成高维四量子比特

录用稿件，非最终出版稿

态。如图 5(e) 所示，光子通过超构表面时，左旋圆偏振光（LCP）或右旋圆偏振光（RCP）被转换为右旋（RCP）或左旋（LCP）的涡旋光，并沿 ±1 级衍射方向传播，对应的拓扑荷为 $2q$。通过这种方式，由双向泵浦 SPDC 光源产生的两光子态 $|\psi_{\text{in}}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\Big(|R\rangle|R\rangle + |L\rangle|L\rangle\Big)$ 可以被转换为一个高维四量子比特态 $|\psi_{\text{out}}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\Big(|R\rangle|2q\rangle|a\rangle|L\rangle + |L\rangle|-2q\rangle|b\rangle|R\rangle\Big)$，其中 a 和 b 分别表示光子沿 $+1$ 和 -1 级衍射的路径。

除了借助单个光子的多个自由度，增加系统中参与纠缠的光子数目同样是提升量子信息容量的有效途径。然而，传统平台上生成多光子纠缠往往面临系统庞大、损耗严重等瓶颈。为了在更紧凑的平台上生成高维度和多光子纠缠，Liu 等 [85] 提出并理论验证了利用单个梯度超构表面制备多光子路径-偏振纠缠的理论方案，如图 5(f) 所示。研究者基于超构表面中由几何相位引入的并行分束器阵列特性，通过精确设计入射光子的路径与偏振组合，使多个非纠缠光子在同一超构表面上发生量子干涉，通过一定的后选择，最终输出多光子纠缠态。更进一步地，超构表面的多光子纠缠投影能力可以用于纠缠融合，实现纠缠光子数目的进一步提升。该方案不仅将纠缠产生的维度从两光子扩展至多光子，且每个光子的路径和偏振自由度均参与纠缠，有效提升了量子信息容量。同时，还可以利用这种并行分束能力进行纠缠融合，构建出更大规模的纠缠态，有望用于超紧凑量子器件和多光子纠缠源。

随着量子态维度的提升，如何将这些复杂的纠缠资源有效地分发至多个终端，成为构建量子网络的核心挑战 [89]。Gao 等 [86] 提出并实验演示了一种利用超构表面实现量子纠缠态多通道分发与转化的新技术，如图 5(g) 所示。该研究通过巧妙设计超构表面的微纳结构单元，基于几何相位实现了对入射纠缠光子的任意偏振操纵和空间分束。通过将两个超构表面（分别具有 M 和 N 个输出通道）放置在偏振纠缠光子对的两个路径中，研究人员成功构建了 $M \times N$ 个纠缠分发通道，并实验演示了 2×2 和 4×4 通道的量子纠缠态分发。这个方案在极小的物理尺度下实现了高保真度、强偏振关联的量子态转化与空间分发，为构建满足多用户多元化通信需求的集成化光量子网络奠定了基础。

而为了更系统地应对大规模量子网络中复杂的干涉需求，研究者们也开始探索更具普适性的设计理论。Capasso 团队 [14] 利用超构表面和图论提出了广义的 Hong-Ou-Mandel 效应，基于单层超构表面实现了并行琼斯矩阵编码空间模式的受控多光子聚束、反聚束和纠缠，如图 5(h) 所示。为了系统化地设计这种复杂的量子干涉过程，研究团队引入了一个图论对偶框架：一方面，图结构能够描述超构表面所实现的多端口干涉仪；另一方面，同一图结构也同时编码了输出光子的非经典关联分布。利用该对偶性，复杂的级联分束器网络可以被简化为图论中的路径求和问题，并逆向推导出超构表面的相位和极化分布，从而将复杂的线性量子光学网络直接转换为单层超构表面。该研究还演示了超构表面产生多路径纠缠态与执行等

录用稿件，非最终出版稿

效高阶 Hadamard 干涉变换的能力，为构建可扩展、低退相干的量子信息基础设施开辟了新道路。

从这些研究可以看到，超构表面在量子态测量与操控中的作用并不只是替代传统光学元件，而是将量子干涉、量子态投影、纠缠分发和多自由度变换等过程集成到单层结构之中。通过对相位、偏振和空间模式的并行设计，超构表面能够在有限空间内完成多端口干涉、多路径分束和多光子态投影，为复杂量子态处理提供高度紧凑的实现方式。然而，这种高度集成的调控方式也使器件误差更直接地进入量子态演化过程，相位偏差、偏振串扰、传输损耗和加工误差都可能改变不同量子路径之间的概率振幅关系，进而影响干涉可见度、量子态重构精度和纠缠保真度。因此，未来的发展重点不应仅是增加通道数或功能数量，还需要提高量子态演化过程的准确性、稳定性和可校准性。

4 量子光学的应用

凭借对光场振幅、相位、偏振及轨道角动量等多自由度的精确调控能力，超构表面不仅能够提升光子对的产生与操控效率，还为构建紧凑、可集成的量子光学系统提供了新的技术路径。近年来，研究者们已将超构表面引入到多种量子信息应用场景中，包括量子成像、量子通信、量子计算以及量子测量与传感等领域，并展示出在系统集成度、功能复杂度和信息处理能力方面的显著优势。

4.1 量子成像

量子成像利用光子之间的量子纠缠或空间关联特性，能够在极低光强下生成高对比度的清晰图像，从而有效突破传统成像中的散粒噪声限制，并在特定条件下提升成像分辨能力。这种新型成像范式为安全通信、生物无损检测、遥感探测和高精度光学传感等领域提供了全新的技术途径 [90–92]。近年来，具有亚波长尺度电磁波调控能力的超构表面被引入该领域，推动量子成像系统向着高度集成化、多功能化和高效能的方向发展。

超构表面首先被巧妙地应用于实现基于纠缠光子的量子边缘检测 [41]。传统的光学边缘检测通常依赖于庞大且对准要求极高的空间滤波系统。通过在成像光路中引入具有空间微分响应的超构表面，可以在动量空间对自旋轨道相互作用进行精准操控，从而直接提取目标图像的高频边缘信息。更为独特的是，利用纠缠光子对的非局域相关性，该方案不仅能在极低照度下工作，还能通过对处于远端的闲置光子进行偏振投影测量，在不改变目标物体光路中任何物理器件的情况下，实现常规明场成像与边缘增强模式之间的非局域、实时切换。在此基础上，随着多维复用技术的发展，具有多种空间频率响应的超构表面进一步催生

录用稿件，非最终出版稿

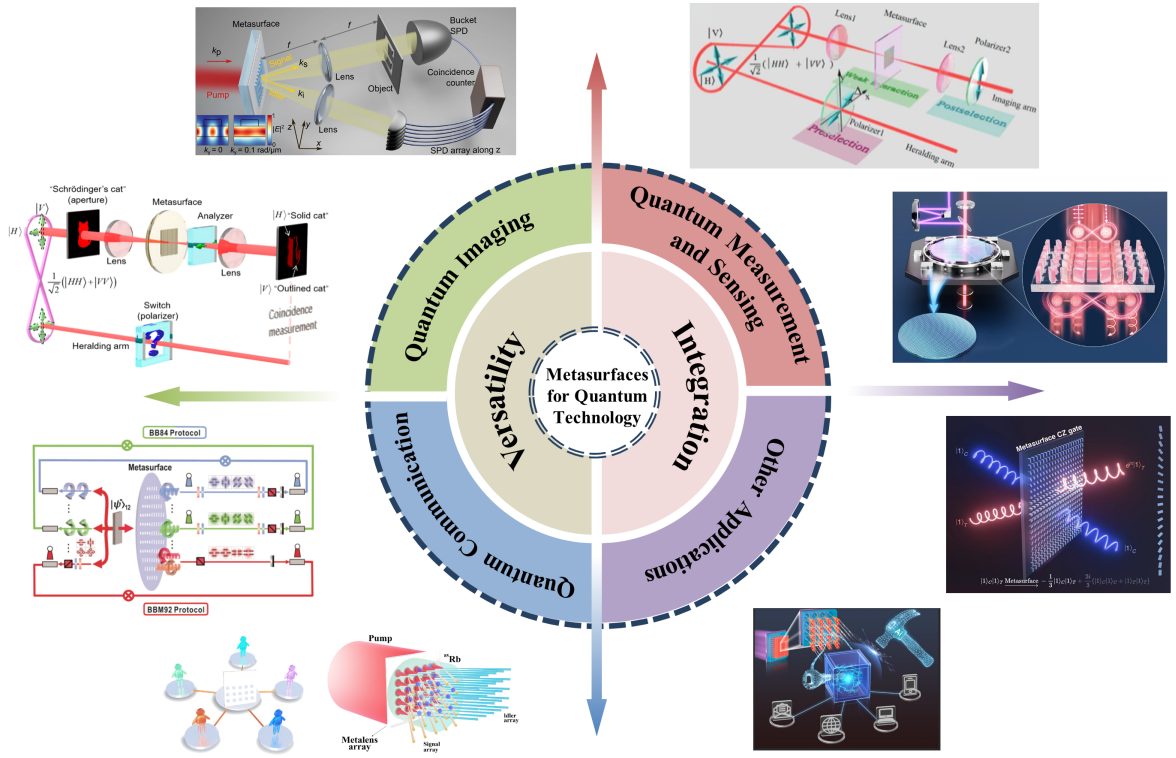


图 6　超构表面在量子光学典型应用场景中的研究进展。图中系统总结了超构表面在量子成像 [15,41,93,94]、量子通信 [43,95]、量子测量与传感 [96,97] 以及量子计算与其他信息处理技术 [16,17] 等核心领域的代表性应用方向，展现了其在推动光量子系统迈向多功能化与高度集成化方面的重要潜力。

Fig. 6. Research progress of metasurfaces in typical application scenarios of quantum optics. The figure systematically summarizes the representative application directions of metasurfaces in core fields such as quantum imaging [15,41,93,94], quantum communication [43,95], quantum measurement and sensing [96,97], as well as quantum computing and other information processing technologies [16,17], demonstrating their significant potential in driving photonic quantum systems toward multi-functionality and high-level integration.

录用稿件，非最终出版

了多模态量子成像系统[15]。研究人员通过精心设计的超构原子阵列，使同一片超构表面能够同时具备多种空间滤波功能。这使得单一成像系统能够在无需任何机械移动组件的前提下，在边缘检测、相衬成像及其空间叠加模式之间进行灵活且高效的切换。这极大提升了针对透明或弱吸收样本的信息获取效率，在对光损伤极度敏感的生物医学观测中展现出巨大的应用潜力。除了定性的特征提取，研究者进一步将超构表面引入到定量相位成像中[93]。在传统的高精度相位恢复过程中，往往需要求解强度传输方程或提取干涉条纹，这在低光强和高噪声环境下极易受到干扰而失效。通过多通道超构表面与量子纠缠源的结合，研究人员实现了对光场多方向相位梯度的高信噪比并行测量。这种高度集成化的设计允许在同一器件上单次获取相位重构所需的全部正交差分信息。该方法不仅大幅简化了传统相位成像系统中复杂的多步操作，还充分利用了量子关联的非经典降噪特性，在极低光强环境下表现出卓越的抗噪声能力和高保真度的相位重建质量。

除了对既有光场的被动空间调制，非线性超构表面已被证明可作为超薄、超紧凑的量子光源，直接在纳米尺度下产生具有高度空间关联的光子对[94]。相较于传统的体块非线性晶体，非线性超构表面通过局域场增强提高了光子对的发射效率，并赋予了其独特的空间模式分布。在这种基于非线性超构表面的新型量子鬼成像方案中，研究人员可以通过全光学手段动态改变相位匹配与共振条件，从而实现对纠缠光子发射方向的调控。这一突破性进展不仅成功替代了传统鬼成像系统中笨重的空间光调制或机械扫描装置，大幅缩减了系统体积，更在扩大视场范围和提升无透镜成像分辨率方面展现出显著优势。

4.2 量子通信

量子通信利用量子叠加与纠缠原理，能够在理论上实现具有信息论安全性的密钥分发与量子态传输。然而，传统的量子通信系统往往依赖体积较大的光学元件，且单一器件功能固化，难以满足未来量子网络对器件微纳化、多功能集成以及可扩展性的需求。

针对这一技术瓶颈，研究人员引入了多通道超构表面来构建高度集成的量子调控与分发器件，实现了多个自旋-轨道角动量杂化态的同时产生与空间分发[43]。这种紧凑的光学架构不仅简化了传统方案所需的复杂光路，还能在同一器件上兼容执行基于 BB84 协议和 BBM92 协议的多协议量子密钥分发，并在实验中均表现出稳定的高安全密钥率和低量子比特误码率。这表明超构表面在替代传统分束与调制网络、实现多协议兼容的紧凑型量子通信终端方面具备可行性。与此同时，超构表面同样展现出构建多用户纠缠网络的潜力[95]。相关研究通过将超构表面阵列与热铷原子气室相结合，利用超构表面对光场进行多模式的空

录用稿件，非最终出版稿

间精细整形，成功生成了包含 5×5 个空间模式的连续变量 EPR 纠缠阵列。基于这一大规模空间纠缠源，研究团队构建了一个包含五个节点的全光量子态共享网络，测试结果显示其多方量子态传输的平均保真度超过了经典极限。

这些工作证明了超构表面在简化量子通信链路配置、提升网络节点扩展能力方面的优势，为未来发展多用户、可扩展的芯片级量子网络奠定了技术基础。

4.3 量子计算

量子计算凭借量子叠加与并行演化特性，在处理复杂系统模拟与特定算法时展现出显著的计算加速潜力。在光量子计算体系中，发挥这一优势的前提是构建高保真度、可精确调控的量子逻辑门。

为此，研究人员利用超构表面丰富的光场操控自由度，提出了一种基于单层梯度超构表面的量子受控相位（CZ）门集成方案 [17]。该设计利用梯度超构表面的并行分光与精准的局部相位调制机制，在微纳尺度下构建了实现量子逻辑操作所需的多路径双光子干涉网络。研究表明，在器件物理尺寸仅为百微米量级的紧凑架构下，该集成化系统不仅实现了多路径干涉的稳定调控，其量子逻辑操作的保真度超过了 99%。相比于传统的体块光学元件或三维光波导方案，基于单层超构表面的架构在维持较高光子传输效率的同时，显著缩减了系统的物理空间占用，有效提升了逻辑门的空间集成密度。

4.4 量子测量与传感

量子测量与传感旨在利用量子资源的非经典特性对微小物理量进行高精度评估，在低光强和复杂噪声背景下展现出超越传统经典测量极限的灵敏度潜力 [98–102]。近年来，超构表面与量子弱测量方法的结合，为量子测量与传感带来了新机遇。

针对光敏或透明生物样本的无损观测需求，研究人员提出了一种超构表面辅助的量子非局域弱测量显微镜 [96]。该方案利用偏振纠缠光子对，巧妙地将超构表面引入成像光路中以构建局域的自旋-轨道相互作用，从而实现对待测样本相位信息的弱耦合。通过对远端处于纠缠态的闲置光子进行后选择投影测量，这种非局域弱测量架构不仅在极低光子通量下实现了相位微扰的有效放大，还利用纠缠光源的关联特性抑制了环境中的噪声。与传统的单光子弱测量系统相比，该方法在同等低照度条件下有效提升了信噪比，从而在获取高精度相位分布的同时，避免了高强度探测光对敏感生物样本可能造成的物理损伤。

此外，在纳米尺度精密定位与位移传感方面，结合超构表面与量子双光子干涉的新型测量器件也展现

录用稿件，非最终出版稿

出了优势 [97]。该研究设计了一种具有梯度分布的超构表面，能够将入射光子的空间位置变化直接映射为光子偏振态的相位演化。在此物理机制的基础上，通过引入双光子干涉效应，微小的横向空间位移被转化为光子符合计数率的急剧变化。实验表明，该超构表面实现了亚波长量级的横向位移探测，并且在达到与经典干涉测量等效精度的前提下，系统所需的探测光子数大幅降低至传统方法的约 3%。这一成果为在低光子计数条件下实现高效的光学精密位移传感，以及推动高集成度量子计量器件的研发提供了可行的设计思路。

4.5 其他应用

除了上述应用外，量子信息技术还包括量子模拟 [103]、量子密码学 [104] 等领域。其中，作为量子密码体系的重要组成部分，具有不可预测性的量子随机数发生器是实现高安全性数据加密与密钥分发的关键组件。

传统量子随机数发生器通常体积较大，且并行输出能力有限。为解决这一问题，研究人员基于超构透镜阵列实现了一种高维的紧凑型量子随机数源 [16]，打破了传统光学器件在维度和密度上的物理局限。该器件通过超构透镜阵列将泵浦激光高效聚焦为多通道光束并照射非线性晶体，从而并行激发多路自发参量下转换光子对。随后通过精准测量单光子到达探测器的时间间隔，系统直接提取出光子发射的内禀量子不确定性，并将其转化为离散的随机数序列。凭借光场阵列的复用特性，该架构大幅提升了随机数的空间生成密度与系统吞吐量。同时，由于其生成机制完全基于量子力学原理，从根本上保证了数值的不可预测性，显著优于依赖纯数学算法的经典伪随机数。验证结果显示，输出的高维序列不仅顺利通过了严苛的 NIST 随机性测试，还能有效抵御机器学习算法的预测攻击。

总体来看，超构表面已在量子成像、量子通信、量子计算和量子测量等应用中展现出紧凑化与多功能集成优势，但这些应用也对器件性能提出了更高要求。与单一器件功能验证不同，实际应用通常涉及从光源产生到量子态调控、传输与探测的完整过程，其中的损耗、串扰或微小误差都可能影响最终的系统效率。不同应用场景对器件性能的侧重点并不完全相同，量子成像通常更关注低损耗、高收集效率以及弱光条件下的信噪比和空间分辨能力；量子通信更强调通道串扰抑制和长距离传输过程中的稳定性；而量子测量与传感更依赖器件对微弱信号的响应灵敏度。因此，后续研究需要更加重视面向具体任务的整体优化，在提高超构表面效率的同时，加强其与实际量子系统之间的匹配设计，使超构表面在复杂应用场景中获得更加稳定的工作表现。

录用稿件，非最终出版稿

5 总结与展望

超构表面凭借其在亚波长尺度上对光场振幅、相位、偏振及轨道角动量等多自由度的高效调控能力，正逐步变革传统光量子信息技术的发展格局。本文系统梳理了超构表面在量子光源制备、量子态操控与测量以及典型量子光学应用场景中的研究进展。在量子光源方面，超构表面通过局域共振增强与波前调控，显著提升了单光子源与纠缠光子对的亮度、收集效率及多功能集成能力，并展示了实现高维与多光子纠缠光源的潜力。在量子态操控与测量方面，超构表面实现了从双光子干涉调控、自旋-轨道纠缠生成到复杂量子态重构与多通道纠缠分发等一系列关键功能，为构建紧凑、稳定且可扩展的量子信息处理平台提供了全新范式。量子成像、通信、计算与传感等应用领域的初步探索，也验证了超构表面赋能光量子信息技术走向实用化的可行性。

尽管基于超构表面的光量子器件已取得令人瞩目的进展，该领域迈向实际应用仍面临若干关键挑战。首先，克服材料与结构损耗对量子相干性的影响是提升器件性能的核心。当前超构表面多基于介质或等离激元材料，前者在共振增强时仍存在辐射损耗，后者则伴随显著的欧姆损耗。这些损耗和散射过程不仅会降低有效收集效率，还可能改变不同量子路径之间的概率振幅关系，从而削弱量子干涉可见度、降低纠缠保真度，并影响弱光成像和量子测量中的信噪比。未来可通过选择更低吸收的介质材料及优化共振设计，在增强光-物质相互作用的同时抑制非辐射损耗。其次，探索从被动结构向主动可重构超构器件的跨越，是提升系统灵活性与功能多样性的关键。当前超构表面多为静态器件，其功能在制备后固定，难以适应量子信息处理中对动态调控的需求。引入可调材料（如液晶[105]、相变材料[53,106]、二维材料）与超构表面集成，可实现光场响应的电光、热光或全光调控，进而发展可重构的量子逻辑门、可调谐纠缠光源及动态量子态测量器件。这将为量子网络的动态路由、量子中继及自适应量子测量提供技术支撑。最后，推动超构表面向大规模集成量子芯片与多学科交叉应用发展，是迈向实用化的必然路径。当前研究多集中于单一功能的演示，未来可通过多层超构表面堆叠、多区域功能分区及与光纤、波导、探测器等元件的单片集成，构建功能完备的量子光路芯片。然而，随着器件规模和通道数量的增加，加工误差、层间对准偏差、模式串扰等问题会更加显著。因此，后续研究需要在器件设计、加工容差、系统封装和误差校准等方面协同优化，使超构表面量子器件在保持紧凑化和多功能优势的同时，在复杂应用场景中拥有稳定的性能。与此同时，超构表面量子器件有望与原子物理、生物传感、精密测量等领域深度融合，例如实现芯片化的量子增强传感系统、高维量子通信终端及生物友好型量子成像探针，推动量子技术从实验室走向实际应用场景。

综上所述，超构表面正以其独特的平面集成与多自由度调控能力，开启光量子信息技术的新范式。随

录用稿件，非最终出版稿

着材料科学、纳米加工与量子光学理论的协同进步，基于超构表面的量子器件有望在不久的将来实现从原理验证到实用系统的跨越，为构建大规模、低功耗、高鲁棒性的集成光量子信息平台奠定坚实基础。

录用稿件，非最终出版稿

参考文献

[1] Gisin N, Thew R 2007 *Nat. Photonics* **1** 165

[2] Knill E, Laflamme R, Milburn G J 2001 *Nature* **409** 46

[3] O'Brien J L 2007 *Science* **318** 1567

[4] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 010401

[5] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L 2011 *Nat. Photonics* **5** 222

[6] O'Brien J L, Furusawa A, Vuckovic J 2009 *Nat. Photonics* **3** 687

[7] Slussarenko S, Pryde G J 2019 *Appl. Phys. Rev.* **6** 041303

[8] Mandel L, Wolf E 1995 *Optical Coherence and Quantum Optics* (Cambridge University Press)

[9] Santiago-Cruz T, Khurana A, Fedotova A, Wang S, Zeisberger A, Stefanov A, Staude I, Setzpfandt F, Chekhova M V 2021 *Nano Lett.* **21** 4423

[10] Bao Y J, Lin Q L, Su R B, Zhou Z K, Song J, Li J, Wang X H 2020 *Sci. Adv.* **6** eaba8761

[11] Li L, Liu Z X, Ren X F, Wang S M, Su V C, Chen M K, Chu C H, Kuo H Y, Liu B H, Zang W B, Guo G C, Zhang L J, Wang Z L, Zhu S, Tsai D P 2020 *Science* **368** 1487

[12] Wang K, Titchener J G, Kruk S S, Xu L, Chung H P, Parry M, Kravchenko I I, Chen Y H, Solntsev A S, Kivshar Y S, Sukhorukov A A 2018 *Science* **361** 1104

[13] Stav T, Faerman A, Maguid E, Oren D, Kleiner V, Hasman E, Segev M 2018 *Science* **361** 1101

[14] Yousef K M A, D' Alessandro M, Yeh M, Sinclair N, Loncar M, Capasso F 2025 *Science* **389** 416

[15] Zhou Y F, Zhu X S, Li T Y, Zhou Z, Bi Q H, Liu J, Chen J, Fu B Y, He J Z, Feng X J, Feng X Y, Liu X Y, Wang Q J, Wang S M, Wang Z L, Qiu C W, Zhu S N 2025 *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **122** e2500760122

[16] Fan Y B, Chen S F, Liu X Y, Che X Y, Qiu X D, Chen M K, Tsai D P 2024 *Appl. Phys. Rev.* **11** 031418

录用稿件，非最终出版稿

[17] Liu Q, Tian Y, Tian Z H, Jia Y L, Li G X, Ren X F, Gong Q H, Gu Y 2025 *Light Sci. Appl.* **14** 193

[18] Yu N, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tetienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333

[19] Wang S M, Liu H, Zhu S N 2014 *Chinese J. Quantum Electron.* **31** 419

[20] Shalaev V M 2007 *Nat. Photonics* **1** 41

[21] Liu Z W, Lee H, Xiong Y, Sun C, Zhang X 2007 *Science* **315** 1686

[22] Jacob Z, Alekseyev L V, Narimanov E 2006 *Opt. Express* **14** 8247

[23] Li X, Ma X L, Luo X G 2017 *Opto-Electron. Eng.* **44** 255

[24] Bomzon Z, Biener G, Kleiner V, Hasman E 2002 *Opt. Lett.* **27** 1141

[25] Zheng G, Muhlenbernd H, Kenney M, Li G, Zentgraf T, Zhang S 2015 *Nat. Nanotechnol.* **10** 308

[26] Xu P, Xiao Y F, Huang H X, Yang T, Zhang X L, Yuan X, Li X C, Wang M Y, Xu H D 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 084201 (in Chinese) [徐平, 肖钰斐, 黄海漩, 杨拓, 张旭琳, 袁霞, 李雄超, 王梦禹, 徐海东 2021 物理学报 **70** 084201]

[27] Sun S, Zhou Z, Zhang C, Gao S, Duan Z, Xiao S, Song Q 2017 *ACS Nano* **11** 4445

[28] Wang S, Wu P C, Su V C, Lai Y C, Chu C H, Chen J W, Lu S H, Chen J, Xu B, Kuan C H, Li T, Zhu S, Tsai D P 2018 *Nat. Nanotechnol.* **13** 227

[29] Balli F, Sultan M, Lami S K, Capasso F 2020 *Nat. Commun.* **11** 3892

[30] Chen W T, Zhu A Y, Sanjeev V, Khorasaninejad M, Shi Z, Devlin R C, Capasso F 2018 *Nat. Nanotechnol.* **13** 220

[31] Khorasaninejad M, Chen W T, Devlin R C, Oh J, Zhu A Y, Capasso F 2016 *Science* **352** 1190

[32] Khorasaninejad M, Capasso F 2017 *Science* **358** eaam8100

[33] Zhang S, Huo P C, Zhu W Q, Zhang C, Chen P, Liu M Z, Chen L, Lezec H J, Agrawal A, Lu Y Q, Xu T 2020 *Laser Photon. Rev.* **14** 2000062

录用稿件，非最终出版稿

[34] Zou X J, Zhang Y M, Lin R Y, Gong G P, Xu S Y, Wu P C, Wang S, Wang Z, Tsai D P, Zhu S N, Li T 2022 *Nat. Commun.* **13** 3288

[35] Meinzer N, Barnes W L, Hooper I R 2014 *Nat. Photonics* **8** 889

[36] Babicheva V E, Evlyukhov A B 2024 *Adv. Opt. Photon.* **16** 539

[37] Santiago-Cruz T, Gennaro S D, Mitrofanov O, Addamane S, Reno J L, Brener I, Chekhova M V 2022 *Science* **377** 991

[38] Kang M, Lau K M, Yung T K, Du S, Tam W Y, Li J 2021 *Opt. Express* **29** 5677

[39] Wang M, Chen L, Choi D Y, Huang S, Wang Q, Tu C, Cheng H, Tian J, Li Y, Chen S, Wang H T 2023 *Nano Lett.* **23** 3921

[40] Gao Y J, Xiong X, Wang Z, Chen F, Peng R W, Wang M 2020 *Phys. Rev. X* **10** 031035

[41] Zhou J X, Liu S K, Qian H L, Li Y H, Luo H L, Wen S C, Zhou Z Y, Guo G C, Shi B S, Liu Z W 2020 *Sci. Adv.* **6** eabc4385

[42] Zhou J X, Qian H L, Chen C F, Zhao J X, Li G R, Wu Q Y, Luo H L, Wen S C, Liu Z W 2019 *Light Sci. Appl.* **8** 80

[43] Jiang Y, Zhong R, Zhang H L, Wang Z, Liu Y F, Fan R H, Qi D X, Tang W J, Wang Z, Peng R, Wang M 2025 *Nano Lett.* **25** 7442

[44] Georgi P, Massaro M, Luo K H, Sain B, Montaut N, Herrmann H, Weiss T, Li G, Silberhorn C, Zentgraf T 2019 *Light Sci. Appl.* **8** 70

[45] Liu J, Su R, Wei Y, Yao B, Silva S F C d, Yu Y, Iles-Smith J, Srinivasan K, Rastelli A, Li J, Wang X 2019 *Nat. Nanotechnol.* **14** 586

[46] Huang T Y, Grote R R, Mann S A, Hopper D A, Exarhos A L, Lopez G G, Klein A R, Garnett E C, Bassett L C 2019 *Nat. Commun.* **10** 2392

[47] Li C, Jang J, Badloe T, Yang T, Kim J, Kim J, Nguyen M, Maier S A, Rho J, Ren H, Aharonovich I 2023 *eLight* **3** 52

录用稿件，非最终出版稿

[48] Jia S T, Li Y K, Xue Z Y, Chen K Y, Li Z, Gong Q H, Chen J J 2023 *Adv. Mater.* **35** e2212244

[49] Wang J, Sciarrino F, Laing A, Thompson M G 2020 *Nat. Photonics* **14** 273

[50] Pan J W, Chen Z B, Lu C Y, Weinfurter H, Zeilinger A, Żukowski M 2012 *Rev. Mod. Phys.* **84** 777

[51] Flamini F, Spagnolo N, Sciarrino F 2019 *Rep. Prog. Phys.* **82** 016001

[52] Kang D, Heo H, Yang Y, Seong J, Kim H, Kim J, Rho J 2024 *Opto-Electron. Adv.* **7** 230216

[53] Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaev V M 2013 *Science* **339** 1232009

[54] Zheludev N I, Kivshar Y S 2012 *Nat. Mater.* **11** 917

[55] Kamali S M, Arbabi E, Arbabi A, Faraon A 2018 *Nanophotonics* **7** 1041

[56] Senellart P, Solomon G, White A 2017 *Nat. Nanotechnol.* **12** 1026

[57] Lodahl P, Mahmoodian S, Stobbe S 2015 *Rev. Mod. Phys.* **87** 347

[58] Aharonovich I, Englund D, Toth M 2016 *Nat. Photonics* **10** 397

[59] Ding X, He Y, Duan Z C, Gregersen N, Chen M C, Unsleber S, Maier S, Schneider C, Kamp M, Hofling S, Lu C Y, Pan J W 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 020401

[60] Jun Y C, Huang K C Y, Brongersma M L 2011 *Nat. Commun.* **2** 283

[61] Bouwmeester D, Pan J W, Mattle K, Eibl M, Weinfurter H, Zeilinger A 1997 *Nature* **390** 575

[62] Liao S K, Cai W Q, Liu W Y, Zhang L, Li Y, Ren J G, Yin J, Shen Q, Cao Y, Li Z P, Li F Z, Chen X W, Sun L H, Jia J J, Wu J C, Jiang X J, Wang J F, Huang Y M, Wang Q, Zhou Y L, Deng L, Xi T, Ma L, Hu T, Zhang Q, Chen Y A, Liu N L, Wang X B, Zhu Z C, Lu C Y, Shu R, Peng C Z, Wang J Y, Pan J W 2017 *Nature* **549** 43

[63] Son C, Sultanov V, Santiago-Cruz T, Anthur A P, Zhang H, Paniagua-Dominguez R, Krivitsky L, Kuznetsov A I, Chekhova M V 2023 *Nanoscale* **15** 2567

[64] Zhang J H, Ma J Y, Parry M, Cai M, Camacho-Morales R, Xu L, Neshev D N, Sukhorukov A A 2022 *Sci. Adv.* **8** eabq4240

录用稿件，非最终出版稿

[65] Jia W H, Saerens G, Talts L, Weigand H, Chapman R J, Liu L, Grange R, Yang Y M 2025 *Sci. Adv.* **11** eads3576

[66] Ma J Y, Fan T M, Haggren T, Valencia Molina L, Parry M, Shinde S, McManus-Barrett C, Zhang J H, Camacho Morales R, Setzpfandt F, Tan H H, Jagadish C, Neshev D N, Sukhorukov A A 2025 *Sci. Adv.* **11** eadu4133

[67] Zhang C, Huang Y F, Liu B H, Li C F, Guo G C 2021 *Adv. Quantum Technol.* **4** 2000132

[68] Chen S F, Peng C, Fan Y B, Qiu X D, Tsai D P 2025 *Light Adv. Manuf.* **6** 59

[69] Krasnok A, Tymchenko M, Alu A 2018 *Mater. Today* **21** 8

[70] Li G, Zhang S, Zentgraf T 2017 *Nat. Rev. Mater.* **2** 17010

[71] Kauranen M, Zayats A V 2012 *Nat. Photonics* **6** 737

[72] Bell J S 1964 *Physics Physique Fizika* **1** 195

[73] Clauser J F, Horne M A, Shimony A, Holt R A 1969 *Phys. Rev. Lett.* **23** 880

[74] Freedman S J, Clauser J F 1972 *Phys. Rev. Lett.* **28** 938

[75] Ning M H, Li N C, Zhong H Z, Yuan Q, Zhang L E, Wang S M, Chen M K, Qiu X D, Ren X F, Hu X M, Liu B H, Liu J M, Cheng Y, Li L, Tsai D P 2025 *Laser Photon. Rev.* **19** e01968

[76] Erhard M, Krenn M, Zeilinger A 2020 *Nat. Rev. Phys.* **2** 365

[77] Krenn M, Huber M, Fickler R, Lapkiewicz R, Ramelow S, Zeilinger A 2014 *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **111** 6243

[78] Nielsen M A, Chuang I L 2010 *Quantum Computation and Quantum Information: 10th Anniversary Edition* (Cambridge University Press)

[79] Monroe C, Meekhof D M, King B E, Itano W M, Wineland D J 1995 *Phys. Rev. Lett.* **75** 4714

[80] James D F V, Kwiat P G, Mattle K, White A G 1999 *Adv. At. Mol. Opt. Phys.* **40** 37

[81] Barnett S M, Croke S 2008 *Contemp. Phys.* **49** 19

录用稿件，非最终出版稿

[82] Joos E, Zeh H D, Kiefer C, Giulini D J, Kupsch J, Stamatescu I O 2003 *Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory.* 2nd edn. (Springer Berlin, Heidelberg)

[83] Li Q W, Bao W, Nie Z Y, Xia Y, Xue Y, Wang S, Yang S, Zhang X 2021 *Nat. Photonics* **15** 267

[84] Li Z X, Zhu D, Lin P C, Huo P C, Xia H K, Liu M Z, Ruan Y P, Tang J S, Cai M, Wu H D, Meng C Y, Zhang H, Chen P, Xu T, Xia K Y, Zhang L J, Lu Y Q 2022 *Photonics Res.* **10** 2702

[85] Liu Q, Liu X, Tian Y, Tian Z H, Li G X, Ren X F, Gong Q H, Gu Y 2025 *Advanced Photonics Nexus* **4** 026002

[86] Gao Y J, Wang Z, Jiang Y, Peng R W, Wang Z Y, Qi D X, Fan R H, Tang W J, Wang M 2022 *Phys. Rev. Lett.* **129** 023601

[87] Zhong H S, Li Y, Li W, Peng L C, Su Z E, Hu Y, He Y M, Ding X, Zhang W, Li H, Zhang L, Wang Z, You L, Wang X L, Jiang X, Li L, Chen Y A, Liu N L, Lu C Y, Pan J W 2018 *Phys. Rev. Lett.* **121** 250505

[88] Zhong H S, Wang H, Deng Y H, Chen M C, Peng L C, Luo Y H, Qin J, Wu D, Ding X, Hu Y, Hu P, Yang X Y, Zhang W J, Li H, Li Y, Jiang X, Gan L, Yang G, You L, Wang Z, Li L, Liu N L, Lu C Y, Pan J W 2020 *Science* **370** 1460

[89] Kimble H J 2008 *Nature* **453** 1023

[90] Pittman T B, Shih Y H, Strekalov D V, Sergienko A V 1995 *Phys. Rev. A* **52** R3429

[91] Moreau P A, Toninelli E, Gregory T, Padgett M J 2019 *Nat. Rev. Phys.* **1** 367

[92] Lemos G B, Borish V, Cole G D, Ramelow S, Lapkiewicz R, Zeilinger A 2014 *Nature* **512** 409

[93] Li Q Y, Liang M G, Liu S Q, Liu J W, Chen S Z, Wen S C, Luo H L 2025 *Opto-Electron. Adv.* **8** 240239

[94] Ma J Y, Ren J L, Zhang J H, Meng J J, McManus-Barrett C, Crozier K B, Sukhorukov A A 2025 *eLight* **5** 2

录用稿件，非最终出版稿

[95] Liu S S, Li L, Wang Y J, Ning M H, Lou Y B, Chen Y X, Zhang R, Wang J B, Chen Q M, Yuan Q, Wang S M, Xiao S M, Tsai D P, Cheng Y, Zhu S, Jing J T 2025 *Sci. Adv.* **11** eadu8455

[96] Liu J W, Yang Q, Shou Y C, Chen S Z, Shu W X, Chen G, Wen S C, Luo H L 2024 *Phys. Rev. Lett.* **132** 043601

[97] Chen S F, Fan Y B, Li H, Qiu X D, Wang B, Zhang L J, Xiao S M, Tsai D P 2026 *Light Sci. Appl.* **15** 68

[98] Helstrom C W 1969 *J. Stat. Phys.* **1** 231

[99] Braunstein S L, Caves C M 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 3439

[100] Pezzè L, Smerzi A, Oberthaler M K, Schmied R, Treutlein P 2018 *Rev. Mod. Phys.* **90** 035005

[101] Degen C L, Reinhard F, Cappellaro P 2017 *Rev. Mod. Phys.* **89** 035002

[102] Toth G, Apellaniz I 2014 *J. Phys. A: Math. Theor.* **47** 424006

[103] Georgescu I M, Ashhab S, Nori F 2014 *Rev. Mod. Phys.* **86** 153

[104] Pirandola S, Andersen U L, Banchi L, Berta M, Bunandar D, Colbeck R, Englund D, Gehring T, Lupo C, Ottaviani C, Pereira J L, Razavi M, Shaari J S, Tomamichel M, Usenko V C, Vallone G, Villoresi P, Wallden P 2020 *Adv. Opt. Photon.* **12** 1012

[105] Zhang Y F, Fowler C, Liang J, Azhar B, Shalaginov M Y, Deckoff-Jones S, An S, Chou J B, Roberts C M, Liberman V, Kang M, Rios C, Richardson K A, Rivero-Baleine C, Gu T, Zhang H, Hu J 2021 *Nat. Nanotechnol.* **16** 661

[106] Yan W, Wang J Y, Qu Y R, Li Q, Qiu M 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 154202 (in Chinese) [严巍, 王纪永, 曲俞睿, 李强, 仇旻 2020 物理学报 **69** 154202]

录用稿件，非最终出版稿

Metasurface-empowered quantum optics: heading towards a new era of applications*

LIU Xingyu, HE Juanzi, FENG Xiaojing, WANG Shuming†

National Laboratory of Solid State Microstructures, School of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract

Quantum information technology has emerged as a promising paradigm for next-generation information processing, offering transformative capabilities in quantum computing, secure communication, and precision measurement. However, the practical implementation of photonic quantum technologies requires compact, scalable, and multifunctional platforms beyond conventional bulky optical systems. Metasurfaces, composed of artificially engineered subwavelength nanostructures, provide an ultrathin and versatile platform for manipulating multiple optical degrees of freedom, including amplitude, phase, polarization, and spatial modes. These unique capabilities enable new approaches toward integrated and multifunctional photonic quantum devices.In this review, we systematically summarize recent advances in metasurface-enabled quantum optics in three major areas: quantum light sources, quantum state manipulation and

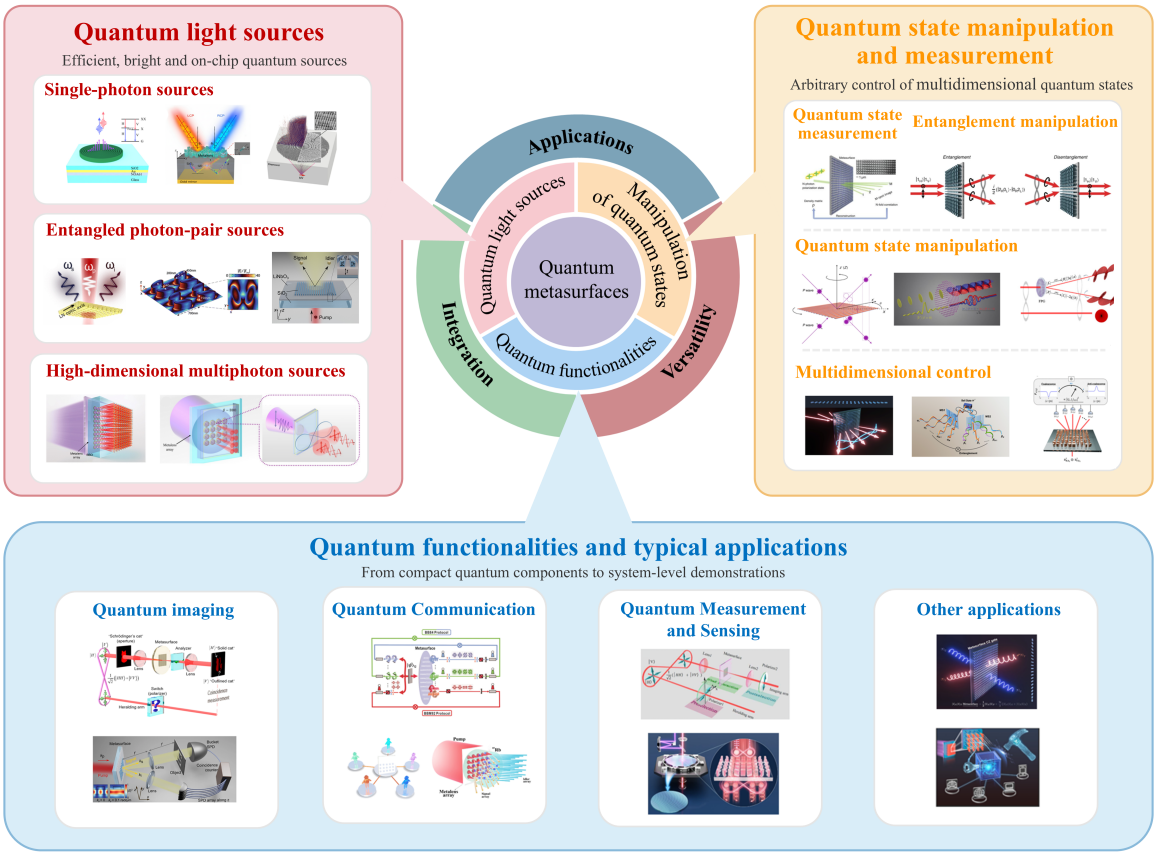
* This work was supported by the National Program on Key BasicResearch Project of China (2024YFB3815900, 2022YFA1404300), the NationalNatuiral Science Foundation of China (Grant No. 62405140, No. 62505131), the OpenResearch Fund of the State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, ChineseAcademy of Sciences (SKLST202218), the Fundamental Research Funds for theCentral Universities (020414380175), and the Jiangsu Provincial NaturalScience Foundation of China (Grant No. BK20240642).

† Corresponding author. E-mail: wangshuming@nju.edu.cn (Corresponding author)
The First Author. E-mail: 652024220029@smail.nju.edu.cn (First author)

录用稿件，非最终出版稿

measurement, and emerging quantum optical applications. We first discuss how metasurfaces enhance and control quantum light sources, including single-photon emitters, entangled photon-pair sources, and high-dimensional multiphoton quantum sources, through efficient emission enhancement, directional control, and multidimensional encoding. We then review metasurface-assisted quantum state manipulation and measurement, including polarization-state analysis, quantum interference, entanglement transformation, and multidimensional quantum state control enabled by precise engineering of optical degrees of freedom. Furthermore, representative applications in quantum imaging, quantum communication, quantum computing, and quantum sensing are highlighted. Finally, we discuss the remaining challenges and future opportunities, including improving optical efficiency, reducing fabrication-induced errors and optical losses, enhancing quantum-state fidelity, and achieving large-scale integration. This review provides a comprehensive perspective on how metasurfaces are accelerating the transition of photonic quantum technologies toward compact, scalable, and highly integrated quantum platforms.

录用稿件，非最终出版稿



Graphical abstract. Overview of metasurface-enabled quantum optics, covering quantum light sources, quantum state manipulation and measurement, and typical quantum optical applications, with emphasis on the integration, versatility, and multifunctionality of quantum metasurfaces.

Keywords: Quantum optics, metasurface, quantum light sources, quantum states

录用稿件，非最终出版稿