

红外量子点的研究进展与挑战: 迈向下一代光电器件

胡寅^{1,2}, 杨珏晗^{1*}, 魏钟鸣^{1,2*}

1. 中国科学院半导体研究所半导体芯片物理与技术全国重点实验室, 北京 100083

2. 中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

* 通信作者. E-mail: yjhyjg@semi.ac.cn, zmwei@semi.ac.cn

红外量子点作为纳米光子学与半导体技术交叉融合的重要研究方向, 近年来在材料设计、可控合成与器件应用等方面取得了系列突破性进展^[1]. 该领域的研究重点围绕材料体系创新、合成方法优化以及器件性能提升等多个维度展开, 呈现出蓬勃发展的态势^[2]. *SCIENCE CHINA Information Sciences* 在 2025 年第 8 期出版了中科院半导体所魏钟鸣等的综述文章 “Recent progress and challenges of infrared quantum dots”. 本文从红外量子点的物理机制、合成方法、应用场景和展望入手, 系统性地介绍了红外量子点的研究现状, 文章结构如图 1 所示.

在基础物性研究方面, 量子限域效应与尺寸依赖性光学特性构成了红外量子点研究的理论基础. 当量子点尺寸小于其激子玻尔半径时, 能带结构会发生显著变化, 这一特性使得通过精确控制量子点尺寸实现从近红外到长波红外的光谱调控成为可能. 理论研究表明, 量子点带隙能量与其半径满足特定的物理关系, 为红外量子点的能带工程提供了理论指导. 当前的研究重点已从单一的尺寸控制扩展到组分调控、表面工程与异质结构设计等多参数协同调控的新范式.

在材料体系方面, IV-VI 族、II-VI 族和 III-V 族半导体材料因其优异的红外光学特性成为研究热点. 其中, PbS 量子点凭借其较大的激子玻尔半径和可调的近红外吸收特性, 在光电探测与光伏领域展现出独特优势; HgTe 量子点则因其极窄的带隙特性, 在中长波红外探测方面表现出卓越性能. 近年来, 新型低毒材料体系如 I-III-VI 族量子点的研发也取得了重要进展, 为环境友好型红外量子点器件的开发开辟了新路径.

在合成方法学上, 胶体化学合成与外延生长构成了两大主要技术路线. 胶体合成方法通过热注入、配体工程等策略, 实现了量子点尺寸、形貌与表面化学的精确控制. 特别是在配体工程方面, 研究人员开发了卤化物配体、双功能配体等新型表面修饰策略, 有效改善了量子点薄膜的电荷传输性能. 外延生长技术则在大规模、高均匀性量子点阵列制备方面展现出独特优势, 为量子点激光器、单光子源等高性能器件的制备提供了材料基础. 值得关注的是, 近年来出现的阳离子交换、界面合金化等新型合成策略, 进一步拓展了量子点组成与结构的调控维度.

在器件应用层面, 红外量子点已在多个方向实现重大突破. 光电探测器方面, 研究人员通过梯度同质结设计、界面工程等策略, 显著提升了器件性能. 例如, 基于 HgTe 量子点的 p-i-n 型梯度同质结光电探测器在室温下实现了高灵敏度的中波红外探测; PbS 量子点与 MXene 等新型电极材料的结合, 则推动了自供电型近红外探测器的发展. 在发光器件领域, 通过核壳结构工程、载流子平衡调控等策略, 量子点发光二极管的外量子效率得到显著提升. InSb 量子点经卤素前驱体调控后, 外量子效率达到 10.1%; HgTe 量子点通过阳离子交换形成的 p-n 结构, 实现了室温下 16 μW 的中红外发射功率. 在激光器方面, PbS/PbSSe 核壳结构量子点实现了亚单激子阈值的红外激光发射, 净模态增益系数达 2180 cm⁻¹, 为小型化红外激光源的发展提供了新方案. 在光伏领域, 红外量子点作为传统太阳能电池的补充材料, 有效拓展了光谱响应范围. 通过有机 – 无机杂化钝化、光学工程等策略, PbS 量子点太阳能电池的效率已

英文原文: Hu Y, Xin K Y, Qiu S Q, et al. Recent progress and challenges of infrared quantum dots. *Sci China Inf Sci*, 2025, 68: 181401, doi: 10.1007/s11432-025-4383-x

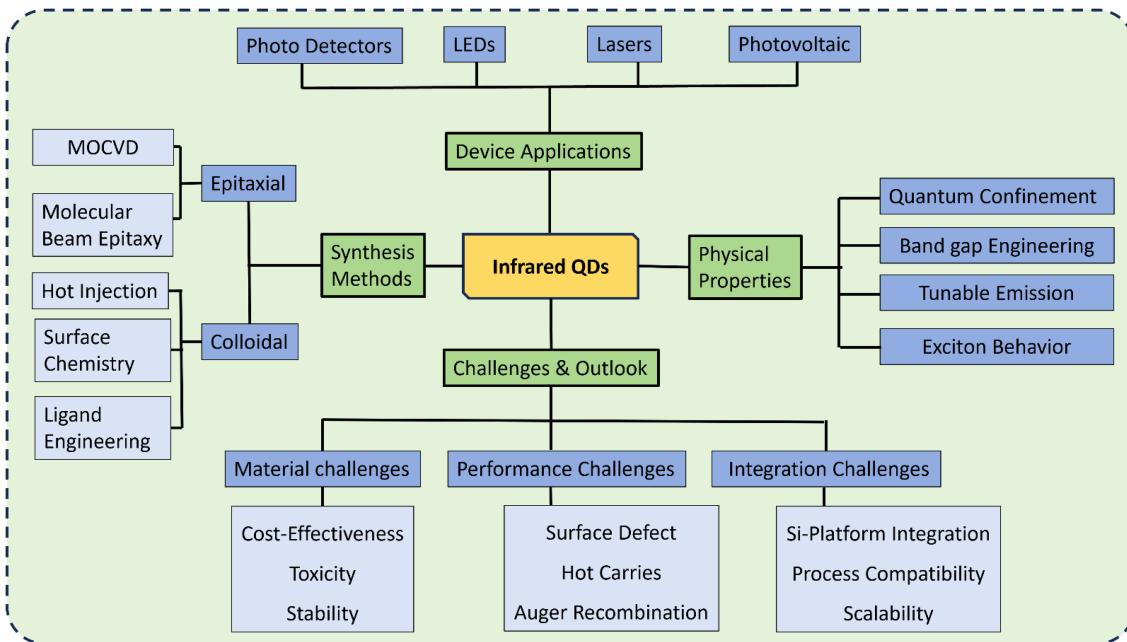


图 1 (网络版彩图) 文章结构示意图.
Figure 1 (Color online) Framework of the review.

取得显著进展,在红外能量收集方面展现出巨大潜力.

然而,该领域仍面临诸多挑战.在材料层面,重金属元素的毒性问题制约着量子点的规模化应用,开发新型低毒、环境友好型量子点材料体系成为当务之急.在性能方面,量子点表面的缺陷态导致的非辐射复合、俄歇复合等问题仍然突出,制约着器件效率与稳定性的进一步提升.在集成技术方面,量子点与硅基平台的异质集成面临晶格失配、热膨胀系数差异等技术瓶颈,需要发展新型缓冲层技术、异质集成方法.此外,量子点器件的大规模制备工艺、长期稳定性等问题也亟待解决.

展望未来,红外量子点技术正朝着多学科交叉、多技术融合的方向发展.在材料设计方面,机器学习辅助的高通量筛选、理论模拟指导的理性设计将加速新型量子点材料的开发.在器件架构方面,“材料 – 器件 – 系

统”的协同优化将成为提升性能的关键路径.在集成技术方面,量子点与硅光子学、柔性电子等平台的深度融合将催生新型红外光电器件与系统.随着这些技术瓶颈的逐步突破,红外量子点有望在高速通信、智能传感、生物医学成像、环境监测等领域发挥更为重要的作用,推动红外光电子技术迈向新的发展阶段.

参考文献

- 1 Lu H, Carroll G M, Neale N R, et al. Infrared quantum dots: progress, challenges, and opportunities. *ACS Nano*, 2019, 13: 939–953
- 2 de Arquer F P G, Talapin D, Klimov V, et al. Semiconductor quantum dots: technological progress and future challenges. *Science*, 2021, 373: eaaz8541.