基于半导体量子点的时间编码量子密钥分发

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/41165.html

基于半导体量子点的时间编码量子密钥分发。导读

量子因特网作为以量子比特为核心资源构建的下一代互联网形态，将为分布式量子计算等前沿量子信息技术提供关键支撑平台。其中，量子安全通信是量子网络的重要组成部分，其目标是利用量子叠加态与量子纠缠来传输和处理信息，从而构建一套理论上安全不可破的全球通信网络。然而，与传统远距离通信所采用的经典光信号不同，承载信息的光量子比特在偏振自由度上极易受到传输信道扰动的影响，进而导致信号失真。相较之下，虽然基于时间自由度的编码在实现上稍微复杂，但相关研究已表面，该方案在长距离传输及复杂信道环境中具有更优的稳定性与鲁棒性。近日，由德国莱布尼茨汉诺威大学王吉鹏/杨靖忠（丁飞教授课题组）联合Michael Zopf教授，以及南京大学尹华磊教授，斯图加特大学Peter Michler教授和安徽大学单磊教授合作开展的研究，首次完成了基于量子点电信波段单光子源的时间编码量子密钥分发（QKD）实验。实验不仅验证了该技术路线的可行性，还刷新了同类条件下单光子光源时间编码 QKD 实验的密钥率纪录，标志着在构建基于固态单光子技术的鲁棒、可扩展量子密钥分发网络方面取得重要突破。相关研究成果以 Time-bin encoded quantum key distribution over 120 km with a telecom quantum dot source 为题发表于国际顶尖光学期刊《Light: Science Applications》。

研究背景

量子密钥分发（QKD）是量子密码学中一项非常成熟且具有代表性的应用。它利用量子力学基本原理实现远距离量子密钥的安全分发，并基于所分发的密钥对经典信息进行理论上不可破译的加密通信。因此，该技术在保障未来量子互联网的信息安全方面具有尤为重要的意义。

半导体量子点（QDs）作为一种基于固体材料体系的量子光源，能够按需产生高质量的单光子或纠缠光子对。其中，在电信波段发光的量子点由于与现有光纤通信窗口高度兼容，在基于地面光纤网络或卫星链路的量子通信系统中展现出极高的应用前景与价值。此前已有一系列研究工作验证了利用量子点发光实现量子通信的可行方案，并证明其在未来量子网络构建中的独特优势。不过，在实现长距离量子通信（如 QKD）的过程中，系统仍面临现实环境带来的严峻挑战。脆弱的量子信号极易受到传输媒介及外界扰动影响，例如光纤振动、温度变化以及自由空间信道中的大气湍流等。为此，传统方案通常需要实时监测接收端量子态变化并进行动态补偿，以维持系统稳定运行。此外，通过对量子信号进行时间自由度编码，也被证明是降低信道扰动影响、提升远距离量子通信鲁棒性的有效技术路径。

研究亮点

本文首次验证了基于电信波段量子点发光信号进行时间编码的QKD实验可行性。在该实验中，研究人员采用了嵌有电信C波段量子点的圆形布拉格光栅的光子晶体器件。得益于珀塞尔增强效应，器件在 C 波段发光表现出显著缩短的辐射寿命，支持光源的高频脉冲激发（图1a）。同时，器件结构散射效应所带来的单向辐射特性，使光源的收集亮度得到进一步提升。量子点器件还展现出优异的单光子发射性能，通过对发射光子的归一化二阶自相关函数统计得到0.85（图1b），据此估算单光子纯度高达 99%。

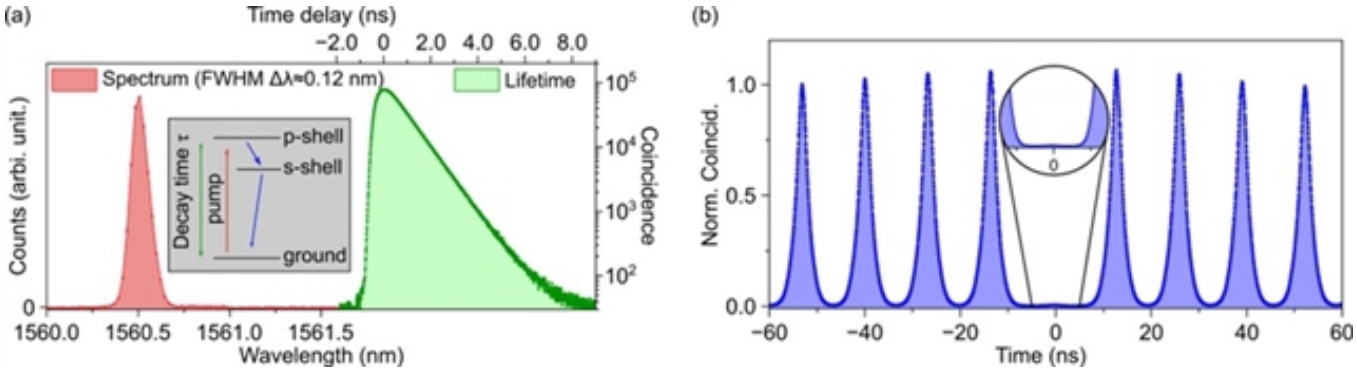

图1：基于量子点的光子晶体器件性能表征。(a)量子点（QD）单光子发射的光致发光光谱以及时间分辨寿命统计直方图（对数坐标）。插图展示了量子点能带结构中p-shell激发态的衰减过程。(b)来自三激子态（Trion state）发射的单光子的归一化二阶自相关统计直方图，插图为中心峰的放大图。

在系统实现方面，量子点在 76 MHz 脉冲激光激发下产生高质量电信波段单光子（图2）。经一系列光谱滤波与偏振调控后，单光子被送入发射端时间编码器，随机编码为预设的时间量子比特，并通过一定长度的标准光纤信道传输至接收端。到达后，编码时间态经由解码器与单光子探测器完成量子态分析。其中，解码器核心由非对称马赫－曾德干涉仪构成，并在干涉臂上配置自适应相位稳定模块，以确保系统能够实现长时间稳定测量。

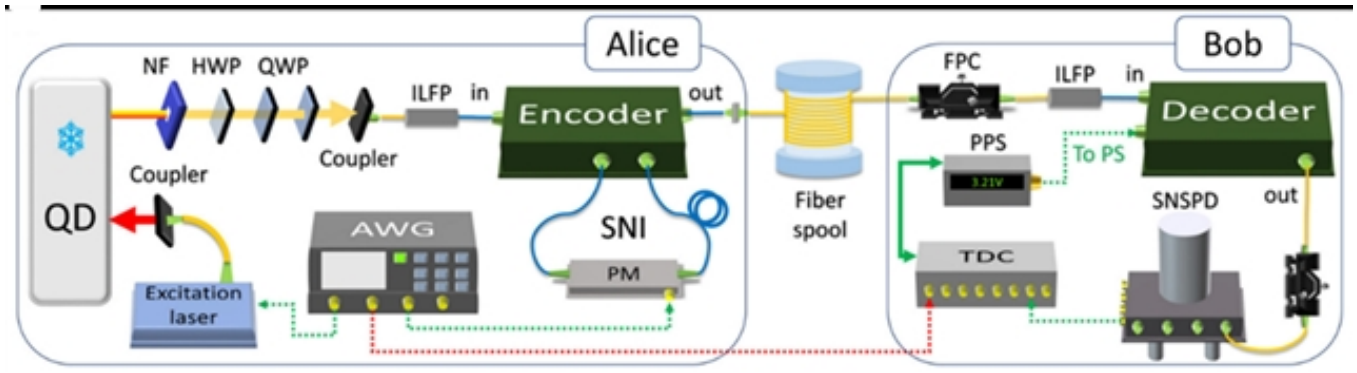

图2：基于时间编码（time-bin）的量子密钥分发实验装置示意图。激光脉冲用于激发置于 4 K 低温恒温器中的量子点。发射出的单光子被收集、滤波后送入编码器，在其中被随机编码为三种时间编码态。时间编码量子比特在接收端（Bob）被解码，接收系统由解码器、超导纳米线单光子探测器（SNSPD）以及时间-数字转换器（TDC）组成。FPC：光纤偏振控制器；PPS：可编程电源。

在实验测试中，研究人员分别评估了系统在 0 km、40 km、80 km 及 120 km 光纤信道条件下的量子比特误码率与安全密钥率表现（图3）。在 120 km

光纤链路上，系统展现出卓越的长期运行稳定性：连续运行 6
小时期间，在无需额外信道补偿机制的情况下，误码率始终稳定低于约 11%
的安全阈值，对应平均可产生约 15 bit/s
的安全密钥率。进一步结合系统参数仿真表明，该方案在 127 km
信道条件下仍可维持正密钥率输出。

图 3：安全密钥率随传输距离的变化。展示了量子比特误码率（QBER）以及可实现的密钥率随光纤传输距离的变化关系。实验结果表明，系统可实现的最远安全传输距离为 127 km。

总结与展望

基于确定性单光子源的 QKD 早前已在城域光纤及自由空间信道中得到验证，但相关实现主要依赖偏振编码方案。然而，此类方案在实际光纤网络中极易受到双折射效应、偏振模色散及偏振相关损耗等因素影响。相比之下，时间编码在光纤信道中具有天然鲁棒性，并已在基于弱相干激光

脉冲的成熟 QKD 系统中获得广泛应用。不过，将时间编码与确定性电信量子点单光子源相结合的可行性此前尚未得到实验验证。

在本研究中，团队构建了一套采用电信波段高亮度量子点单光子源的时间编码 QKD 系统。概念验证实验成功展示了在 120 公里光纤链路上实现安全密钥分发的能力，并在连续 6 小时运行过程中保持优异稳定性。本工作首次实现了电信波段量子点单光子源与时间编码 QKD 的实验结合，同时刷新了相同损耗条件下基于单光子源时间编码 QKD 的最高安全密钥率纪录。该成果标志着量子点技术在构建稳健、可扩展且面向实际应用的量子通信基础设施方面迈出关键一步。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.1038/s41377-026-02205-9

作者：王吉鹏等 来源：《光：科学与应用》