arXiv:2603.11314v1 [quant-ph] 11 Mar 2026

QuaNTUM：面向可扩展光纤与卫星集成的模块化量子通信测试平台

Julien Ch´ened´e, [1, 2, *] Tjorben Matthes, [1,2] Josefine Krause, [1,2,3] Asli Cakan, [1,2] 和 Tobias Vogl[1,2,†]
[1]计算机工程系，慕尼黑工业大学计算、信息与技术学院，慕尼黑工业大学，*80333* 慕尼黑，德国
[2]慕尼黑量子科学与技术中心（*MCQST*），*80799* 慕尼黑，德国
[3]耶拿弗里德里希·席勒大学，*Albert-Einstein-Straße 5*，*07745* 耶拿，德国

安全通信是现代社会的基石，支撑着从金融交易到关键基础设施等各个领域。随着不断增强的计算能力对经典加密构成日益严峻的威胁，量子通信利用物理定律保护数据，为此提供了一种从根本上安全的替代方案。

我们介绍 QuaNTUM（慕尼黑工业大学量子网络），这是一个模块化、可扩展的量子通信测试平台，旨在通过基于光纤的校园网络和卫星地面链路，实现可扩展、灵活且安全的量子通信。QuaNTUM 集成了部署在小型卫星上的固态量子发射体早期方案，连接地面与自由空间信道。作为一个开放访问平台，它支持量子通信协议实验、量子器件基准测试和混合网络集成。

地面网络采用单模光纤和星形拓扑，连接慕尼黑附近加兴高科技园区内的大学和研究机构。每个节点均配备保偏组件、多路复用器和时间同步分析模块，并通过中央交换枢纽实现动态路由。主动偏振控制和实时反馈可确保较低的错误率和稳定的量子比特传输，从而实现高保真度的量子密钥分发（QKD）和纠缠分发。

QuaNTUM 的一项核心工作是采用基于光学活性缺陷的确定性单光子源，例如六方氮化硼（hBN）中的缺陷或激发态铒原子。这些光源目前正部署于轨道上，标志着固态量子发射体在太空中的首批演示之一。通过将光纤与自由空间链路、可扩展硬件和开放协议结合起来，QuaNTUM 为未来的混合量子网络提供了基础，可同时支持当前的测试平台研究和全球量子互联网的长期愿景。

关键词：量子通信、hBN 单光子发射器、立方体卫星、基于光纤的测试平台、量子网络架构

I. 引言

量子计算机的出现威胁着当今的加密网络，因为它能够高效地解决复杂的数学问题（例如大整数因数分解），而如今我们大多数安全通信系统都依赖于此类问题的计算难度 [1]。一种替代方案是量子通信，它能够确保通信免受任何窃听者，甚至网络运营者的侵害。过去几年中，多个项目通过卫星进行远距离通信 [2]，以及通过光纤进行较短距离通信 [3]，证明了此类链路的可行性。在量子中继器具备技术可行性并实现完整的“量子互联网”之前，可以同时利用光纤和卫星链路构建混合网络，并由卫星充当可信节点。最终，QuaNTUM 旨在实现远距离量子组网，连接远程量子处理器，并支持可靠的量子信息交换。

量子密钥分发（QKD）是一项非凡的技术：它利用物理学的基本定律来保障通信安全。通过将密钥编码到单个光子上，得益于不可克隆定理，窃听变得不可能 [1]，而且任何测量光子的尝试都会扰动光子。然而，仍有一个局限：如果仅依赖光纤，量子密钥分发在传输几百公里后便会受阻，某些实现方式的传输距离甚至更短。信号会呈指数级衰减，而且与经典信号不同，单靠放大无法解决这一问题。

实现真正的“量子互联网”依赖于量子中继器，而量子中继器目前仍处于早期阶段 [3]。与此同时，有一种折中方案：采用混合方法，兼取两者之长。卫星可以通过自由空间跨越遥远距离；在 10 公里以上，信号损耗几乎可以忽略不计，而光纤网络则负责连接最后几公里，将建筑物、校园乃至城市连接起来。

尽管取得了这些进展，但仍存在一个关键缺口：缺乏一个大规模、真实世界的开放式测试平台，能够将这些技术整合到一个统一的框架中。QuaNTUM 项目通过在慕尼黑附近的加兴校区建设星形拓扑光纤网络，应对这一整合挑战。该基础设施将多个研究所和实验室互联起来，实现量子资源的共享访问。不同于已经在波士顿、维也纳、东京和中国得到演示的可信节点量子密钥分发网络，

* julien.chenede@tum.de
† tobias.vogl@tum.de

QuaNTUM 被设计为一个开放式研究测试平台，可直接连接实验室，开展端到端量子实验，而无需依赖中间的可信中继。研究人员因此可以开展涉及单光子发射的实验，例如来自六方氮化硼 [4] 色心或掺铒材料的 [5], 光学量子存储器 [6, 7], 以及各种量子密钥分发协议 [3], , 同时研究量子纠缠分发 [8]。

在后续阶段，网络将扩展至慕尼黑市中心和一座地面站，以支持光学卫星链路。采用低地球轨道立方体卫星 QUICK³ [9],开展的准备工作已在进行中，该卫星正在微重力环境下进行基础量子光学实验。调试阶段完成后，QuaNTUM 网络将向慕尼黑量子科学与技术中心（MCQST）、慕尼黑量子谷（MQV）及外部合作伙伴开放。这将促进安全量子通信、量子传感和量子存储器接口等领域的协作研究。

II. 量子测试平台架构

A. 光纤骨干网

QuaNTUM 光纤骨干网采用以 TUM-MI 节点（数学与计算机科学系）为中心的星形单模网络架构，该节点大致位于校园中心。部分标准电信波段 SMF-28 光纤构成主要的校园骨干网，并连接**图 1**中所述的主要站点，链路长度通常为 1 至 2 km。中心节点配置量子可重构光分插复用器（q-ROADM），用于波长解复用/复用、低损耗光交换，并为偏振控制硬件和时序分发提供集中节点。网络设计保留了直接建立光纤到光纤链路的选项，以尽量降低关键量子信道的插入损耗。

线缆的组成和连接器端接方式经过选择，以兼顾与电信基础设施的兼容性以及量子系统的特定波长要求。每根主干线缆都包含多根 SMF-28光纤（针对 1330 nm 和 1550 nm 的电信 O波段/C波段优化），以及专用短波长光纤（780-HP 和 1060-XP），以支持关键量子技术 [10]:

- 固态量子比特：金刚石色心（例如，738nm处的硅空位色心 [11]）和碳化硅（例如，发射较长近红外波长的硅空位色心 [12]）需要近可见光至近红外波长，但低于780nm时光纤的衰减对于公里级链路而言过高，因此我们的设计将780nm设为下限。
- 量子存储器：稀土掺杂晶体（例如，793nm处的 Tm^{3+}:Y_2SiO_5 [13]）和碱金属蒸气（例如，780nm处的铷D2跃迁 [10]）通常在700–800nm范围内工作，因此我们将780-HP光纤纳入设计。
- 电信兼容性：长距离量子通信利用近红外 (NIR) 自由空间窗口和电信 O/C 波段（1330/1550 nm）。

量子端口指定采用 E2000 APC 单工端接，以最大限度减少背向反射，并支持单独的光纤接入。损耗预算和噪声缓解是核心设计约束。端到端光损耗模型包含光纤衰减、熔接损耗、连接器对接损耗，以及无源/有源元件（波分复用 [14], 开关、偏振器）的插入损耗。为保护单光子信道免受经典噪声影响，高功率经典信号会按光谱分离，或通过独立光纤传输；采用 APC 连接器以减少背向反射。对于偏振编码协议，骨干网采用电动光纤偏振控制器 (FPCs) 和软件反馈，以在环境扰动下保持态保真度。市售设备可提供偏振补偿，例如基于硅的解码器[15], 普克尔斯盒 [16] 和光纤挤压器件 [17]。

B. 定时与控制

同步和确定性控制是所有 QuaNTUM 量子实验的基础：它们能够实现可靠的符合探测、准确的协议定时，以及针对偏振和路由的自动反馈。因此，定时架构结合了专用的经典参考信道、每个测量节点上的本地高分辨率时间标记，以及用于驱动有源硬件并管理实验调度的协调控制平面。

在量子波长旁配置低抖动经典参考信道，用于分发 10 MHz 时钟和每秒 1 个脉冲（PPS）标记。这提供了稳定、统一的时间基准，并避免了卫星参考源在短距离校园网络中的诸多局限。每个偏振分析模块（PAM）都配备一个同步时间标记器，能够以低于 100 ps 的分辨率进行到达时间标记；这些本地时间戳对于符合分析、量子比特误码率（QBER）估算和后处理至关重要。

为了实现确定性、低延迟分发和可扩展的网络定时，该测试平台将评估 White Rabbit [18]等精密时间协议，因为它们能够在光纤链路上提供亚纳秒级同步和已知的延迟界限。

控制平面在硬件层采用 FPGA/嵌入式控制的混合实现，并由

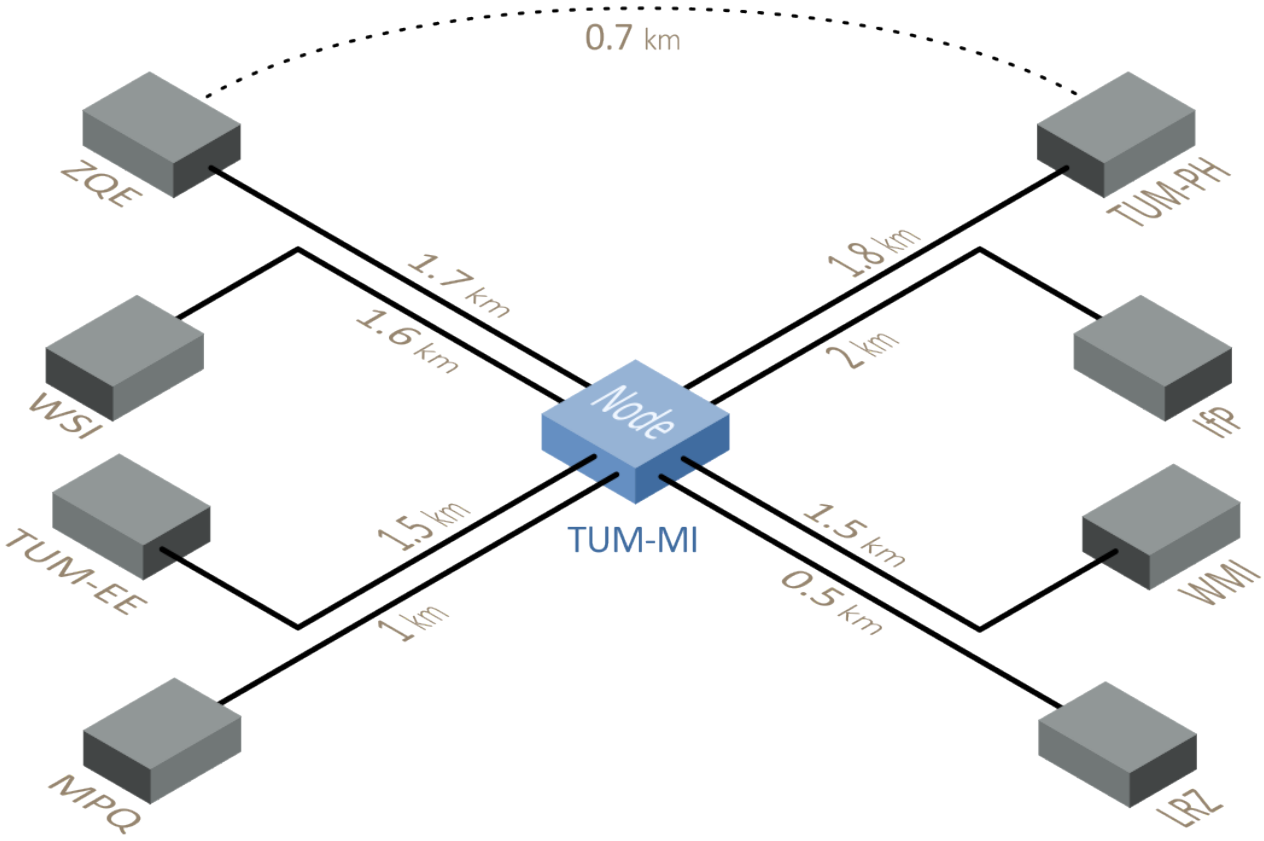

图1. 慕尼黑附近加兴校区 QuaNTUM 测试平台的拓扑结构：物理系 (TUM-PH)、电气工程系 (TUM-EE)、马克斯·普朗克量子光学研究所 (MPQ)、莱布尼茨超级计算中心 (LRZ)、Walter Schottky 研究所 (WSI)、Walther-Meißner 研究所 (WMI) 之间通过 SMF-28 ultra 光纤、780-HP 和 1060-XP 实现星形光纤连接，中心节点位于计算、信息与技术学院 (TUM-MI)。另有一条仅使用 SMF-28 ultra 光纤的专用电缆，直接连接 ZQE 和 TUM-PH（虚线）。– 地理位置请参阅地图：https://v.bayern.de/N74hf – ©巴伐利亚测绘管理局 2025

管理层的集中式调度器负责协调。与 q-ROADM 和用户节点共址的 FPGA 单元或微控制器，以微秒级执行时间对光学开关、电光调制器和电动偏振控制器实施确定性控制。对时序要求严格的控制回路（例如实时偏振补偿）在每个节点本地运行（快速扰动、本地评估、接受/拒绝），而更高层级的策略（何时执行完整的基准重新校准、如何安排卫星过境）则由中央统一管理。

实际部署需要进行明确的校准和监测：必须测量并记录每条链路的固定延迟（使用光时域反射仪和双向时间传递），表征时间标记器偏移和电缆色散效应，并将持续遥测数据（探测器计数、量子比特误码率、温度）集成到控制面板中。这些要素共同确保 QuaNTUM 达到所需的时间精度和运行自动化水平，从而支持在校园规模的混合光纤网络中可靠地开展量子密钥分发和纠缠分发实验。

C. 纠缠与量子密钥分发层

从安全角度看，协议可分为设备无关协议（理论上可抵御所有攻击，不作任何硬件假设）和设备依赖协议（依赖可信的测量工具，但兼容现成组件）。在实践中，实现方式可分为离散变量（例如偏振光子）和连续变量（例如相干态）两类 [19]。量子密钥分发协议主要有三种类型（表1）[19]:

QuaNTUM正在同一物理骨干网上实现两个互补的量子信道层：一个

表 I. 按结构分类的量子密钥分发协议

Type	密钥机制
制备-测量（PM）	Alice 制备量子态；Bob 对其进行测量以生成共享密钥。
基于纠缠	Alice 和 Bob 利用纠缠粒子关联进行密钥分发。
测量设备无关	即使测量设备不可信，安全性仍能得到保障。

面向多用户的波长复用纠缠分发层，以及一个支持标准方案的制备-测量量子密钥分发层。

对于纠缠分发，指定采用萨格纳克结构中的宽带自发参量下转换（SPDC）光源 [20] 作为主要的光子对发生器。SPDC 输出经解复用器进行频谱划分；中心节点中的量子可重构光分插复用器将信道对分配至端点链路，从而构建可重构的波长复用纠缠网络。在每个用户端点，偏振分析模块（PAM）执行随机基选择，并进行偏振投影和探测。以低于 100 ps 的分辨率对事件进行时间戳标记，可实现符合识别与关联分析，以验证纠缠。该架构旨在支持多跳协议 [18]，并在需要时将闲频光子路由至中间贝尔态测量站，从而能够开展网络化纠缠分发测试。

PM 层将支持多种标准量子密钥分发实现方式（例如 B92、BB84、SARG04 [19]）。基于六方氮化硼（hBN）局域缺陷（位于 575 nm）的确定性单光子发射器主要用于短距离或芯片实验，因为其可见光波段发射不适用于通过电信波段光纤进行长距离传输。为了与测试平台的骨干网集成，将采用频率转换策略：可见光子通过非线性光学 [21]转换为电信波段光子，然后进入网络。

对于长距离运行，测试平台配备了可选光源（例如兼容电信波段的自发参量下转换光子对 [22] 或基于铟镓砷的单光子发射器[23]）。实时运行控制通过闭环确保安全运行：测得的量子比特误码率和符合统计驱动本地反馈（电动光纤偏振控制器和软件程序），以实时进行偏振补偿和校准。

III. 六方氮化硼中的单光子发射器

A. 确定性制备

在 QuaNTUM 中，我们通过标准扫描电子显微镜（SEM）对多层 hBN 进行局部电子束辐照，实现确定性制备[24]。辐照位置精确定位至亚微米坐标，以高横向精度制备发射体阵列；工艺参数（束流能量、电流、剂量和光斑驻留时间）经过优化，以最大限度提高产率和光谱可重复性。所制备的发射体在 575nm 附近呈现可重复的零声子线（ZPL），并与密度泛函计算所鉴定的碳相关缺陷复合体相符[25]。由于发射体位置预先已知，这种方法兼容晶圆级图案化流程，也适用于后续片上或微光学集成先验。可扩展性取决于曝光图案化的自动化、hBN 薄片或薄膜的批量处理，以及通过优化产率来减少逐器件筛选。对于光纤耦合模块或片上阵列的生产，确定性位点会预先与光刻定义的光子结构（波导、腔、光栅耦合器）对准，使后续组装和耦合主要成为机械对准任务，而非光学对准任务。

B. 光学性能

六方氮化硼中存在种类丰富的量子发射体，其零声子线（ZPL）波长范围从紫外到近红外 [26]，，因此能够与多种量子系统兼容。本文重点研究通过局域辐照产生的缺陷；在 530 nm 飞秒激光激发下，这些缺陷的发射峰位于 575 nm，在室温下的典型线宽（半高全宽）为数十纳米（**图 2**）。二阶关联函数 $g^{(2)}(0) < 0.1$ 证实了单光子发射 [24]，，而据报道，其激发态寿命为 3.83(1) ns，支持高重复频率运行 [24]。许多位点在辐照 3 年后仍表现出长期光稳定性，但要用于网络部署或空间应用，仍需进行器件级验证，包括评估其在不同温度和光泵浦条件下的性能。可见光波段零声子线和室温线宽有利于实现高亮度、高速率运行，但与标准 SMF-28 电信基础设施及窄带量子存储器的兼容性面临挑战。针对这些问题，可采用两种相关的工程策略：（1）通过光子工程（微腔、Purcell增强、应变或电场调谐）实现光谱窄化和调谐，以减小有效线宽并稳定零声子线；（2）采用量子频率转换（QFC），将发射光子转换至电信波长，以实现低损耗光纤传输，或使其匹配量子存储器的原子跃迁。微腔耦合还可提高收集效率，降低达到目标密钥率或符合计数率所需的

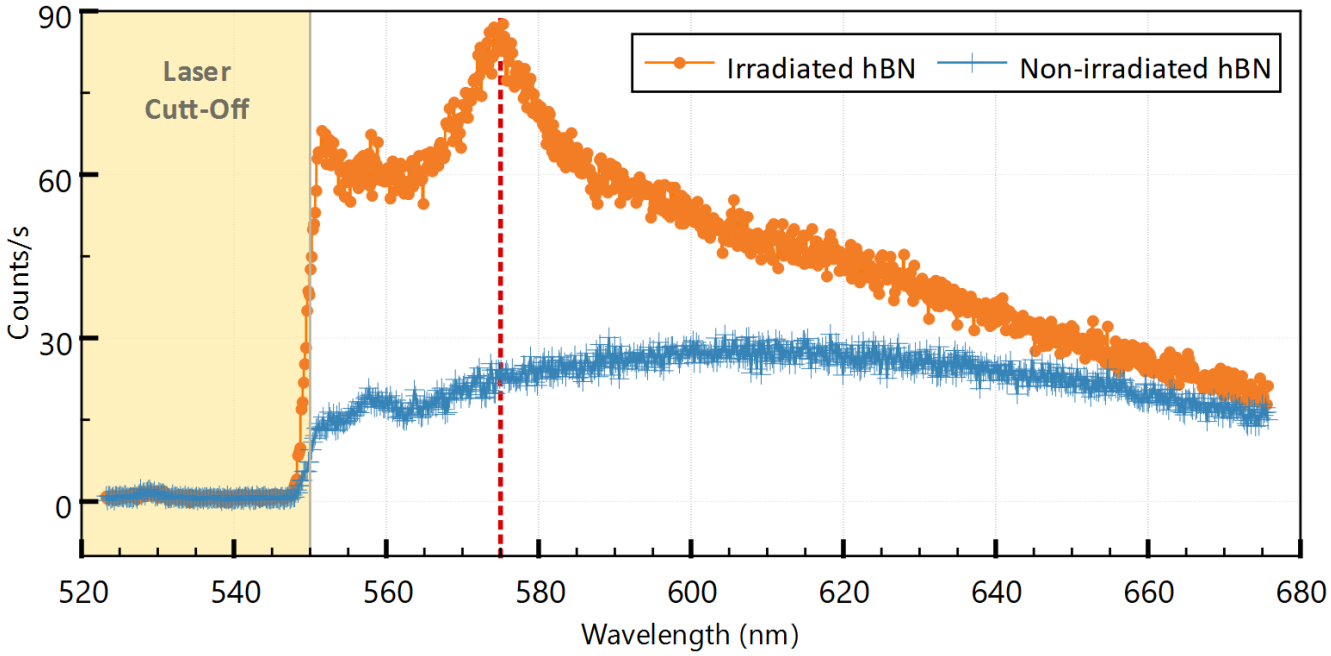

图2. 通过局域电子辐照制备的单个六方氮化硼发射体的室温光致发光光谱，发射峰位于约575 nm附近（橙色线）。与未辐照六方氮化硼（蓝色线）的比较。激光激发波长为530 nm，长通滤光片为550 nm。

光源亮度，而只要充分抑制转换噪声，量子频率转换就能保持量子统计特性。

C. 集成光子学

将六方氮化硼发射体与光子平台（例如光纤集成平台 [27]）集成，可实现三个目标：提高向单模光纤中的收集/耦合效率，控制发射动力学（珀塞尔效应），并实现紧凑、稳定模块的芯片上路由和切换 [4]。实际应用中，利用光刻标记和高精度组装，将确定性发射体位点对准芯片上波导、微腔或光栅耦合器。有限差分时域法（FDTD）仿真可指导谐振器和波导设计，以最大限度提高耦合效率，并使腔共振相对于发射体零声子线处于合适位置[28]。得益于光子集成，卫星部署通常需要满足更严格的设计约束。QUICK³ 载荷方案采用基于 MoSe 的另一种发射体平台的微型化版本$_2$ [9]：芯片安装在紧凑且具备热管理功能的光学平台内，其中包括泵浦激光器、稳频光学器件、光纤耦合级和指向接口。封装方案着重确保机械韧性（抗振动和冲击能力）、在预期轨道温度范围内进行热控制、有源器件的耐辐射性，并尽量减少运动部件。

IV. 结论

总之，QuaNTUM 项目通过提供一个大规模、真实环境下的开放式测试平台，弥补了量子通信领域的一项关键空白。该平台将光纤和卫星链路整合到一个统一框架中，类似于覆盖整个校园的混合网络，为研究人员和工程师提供一个受控而又动态的环境，以便在真实条件下通过实验验证、改进并评估系统性能。QuaNTUM 利用固态量子发射体和偏振控制等先进技术，力求克服当前量子通信系统的局限性。成功集成这些技术有望为全球量子互联网铺平道路，实现安全通信和先进的量子应用。未来的工作将着重扩展网络、提升量子发射体的性能，并探索量子通信与传感领域的新应用。

数据可用性

本研究的所有数据均可在提出合理请求后向作者获取。

注释

作者声明，他们不存在与本文内容相关的利益冲突。本文为作者接受稿，论文发表于《计算机与信息科学通信》（CCIS），第 2743 卷，施普林格（2026 年）。

致谢

本研究是慕尼黑量子谷计划的一部分，该计划由巴伐利亚州政府提供支持，经费来自巴伐利亚高科技议程Plus。本研究由德国研究基金会（DFG）根据德国卓越战略资助，项目编号为EXC-2111-390814868（MCQST）。作者感谢联邦研究、技术与航天部（BMFTR）通过项目编号13N16292（ATOMIQS）提供的支持。

[1] N. Gisin、G. Ribordy、W. Tittel 和 H. Zbinden, 《量子密码学》, 《现代物理评论》74，145（2002）。[2] C.-Y. Lu、Y. Cao、C.-Z. Peng 和 J.-W. Pan, 《墨子号在太空中的量子实验》, 《现代物理评论》94，035001（2022）。[3] G. Granados、W. Velasquez、R. Cajo 和 M. Antonieta-Alvarez, 《多光纤网络中的量子密钥分发及其在城市通信中的应用：综述》, IEEE Access 13，100446（2025）。[4] T. Vogl、R. Lecamwasam、B. C. Buchler、Y. Lu 和 P. K. Lam, 《利用六方氮化硼实现紧凑型腔增强单光子产生》, ACS Photonics 6，1955（2019）, https://doi.org/10.1021/acsphotonics.9b00314。[5] A. Gritsch、L. Weiss、J. Fr¨uh、S. Rinner 和 A. Reiserer, 《铒注入硅波导中的窄光学跃迁》, 《物理评论X》12，041009（2022）。[6] A. I. Lvovsky、B. C. Sanders 和 W. Tittel, 《光学量子存储》, 《自然-光子学》3，706（2009）。[7] A. C̦akan、C. Cholsuk、A. Gale、M. Kianinia、S. Pa̦cal、S. Ate̦s、I. Aharonovich、M. Toth 和 T. Vogl, 《六方氮化硼缺陷的量子光学应用》, 《先进光学材料》13，2402508（2025）。[8] S. P. Neumann、A. Buchner、L. Bulla、M. Bohmann 和 R. Ursin, 《通过跨国248公里光纤链路实现连续纠缠分发》, 《自然-通讯》13，6134（2022）。[9] N. Ahmadi、S. Schwertfeger、P. Werner、L. Wiese、J. Lester、E. Da Ros、J. Krause、S. Ritter、M. Abasifard、C. Cholsuk、R. G. Kr¨amer、S. Atzeni、M. G¨undo˘gan、S. Sachidananda、D. Pardo、S. Nolte、A. Lohrmann、A. Ling、J. Bartholom¨aus、G. Corrielli、M. Krutzik 和 T. Vogl, 《快速设计用于量子通信及太空扩展物理理论检验的星载量子光源》, 《先进量子技术》7，2300343（2024）。[10] C. Cholsuk、S. Suwanna 和 T. Vogl, 《为量子应用定制六方氮化硼中色心的发射波长》, 《纳米材料》12，10 3390 12142427 2022 。/nano（）。[11] C. Bradac、W. Gao、J. Forneris、M. E. Trusheim 和 I. Aharonovich, 《金刚石中IV族缺陷的量子纳米光子学》, 《自然-通讯》10，5625（2019）。[12]S. Castelletto, 《碳化硅单光子源：挑战与前景》, 《量子技术材料》— nology 1, 023001 (2021). [13] C. Simon, M. Afzelius, J. Appel, A. Boyer de la Giro- day, S. J. Dewhurst, N. Gisin, C. Y. Hu, F. Jelezko, S. Kr¨oll, J. H. M¨uller, J. Nunn, E. S. Polzik, J. G. Rarity, H. De Riedmatten, W. Rosenfeld, A. J. Shields, N. Sk¨old, R. M. Stevenson, R. Thew, I. A. Walmsley, M. C. Weber, H. Weinfurter, J. Wrachtrup, and R. J. Young, 量子存储器, 《欧洲物理学杂志 D》58, 1 (2010). [14] M. Bathaee, M. Rezai, and J. A. Salehi, 量子波分复用和多址通信系统与网络：全球统一方法, 《物理评论 A》107, 012613 (2023). [15] Y. Du, X. Zhu, X. Hua, Z. Zhao, X. Hu, Y. Qian, X. Xiao, and K. Wei, 用于偏振编码量子密钥分发的基于硅的解码器, 《芯片》2, 100039 (2023). [16] C. Caputo, M. Simoni, G. A. Cirillo, G. Turvani, and M. Zamboni, 量子密钥分发系统中光学相干态演化的模拟器, 《光学与量子电子学》54, 689 (2022). [17] F. Kaiser, B. Fedrici, A. Zavatta, V. D'Auria, and S. Tanzilli, 用于光纤量子网络的全导波压缩实验, 《光学》3, 362 (2016). [18] M. Alsho wkan, J. M. Lukens, H.-H. Lu, and N. A. Pe- ters, 多跳量子网络中的弹性纠缠分发, 《光波技术杂志》, 1 (2025). [19] M. Kumar and B. Mondal, 量子密钥分发协议简述, Multimedia Tools and Applications 84, 33267 (2025). [20] T. Str¨omberg, P. Schiansky, R. W. Peterson, M. T. Quintino, and P. Walther, 萨格纳克结构中量子交换机的演示, 《物理评论快报》 131, 060803 2023( ). [21] P. Fisher, R. Cernansky, B. Haylock, and M. Lobino, 用于电信波段频分复用量子网络的单光子频率转换, 《物理评论快报》127, 023602 (2021). [22] R. Ikuta, Y. Kusaka, T. Kitano, H. Kato, T. Yamamoto, M. Koashi, and N. Imoto, 用于可见光至电信波段波长转换的宽带量子接口, 《自然-通讯》2, 537 (2011). [23] J. Zhang, M. A. Itzler, H. Zbinden, and J.-W. Pan, 铟镓砷/磷化铟单光子探测器系统的进展

量子通信，Light: Science &Applications **4**，e286 (2015)。[24] A. Kumar, C. Cholsuk, A. Zand, M. N. Mishuk, T. Matthes, F. Eilenberger, S. Suwanna, and T. Vogl, 在六方氮化硼中局部生成黄色单光子发射碳复合体，APL Materi- als **11**，071108 (2023)。[25] C. Cholsuk, S. Suwanna, and T. Vogl, 固态量子系统中缺陷识别的综合方案，The Journal of Physical Chemistry Letters **14**，6564 2023( )。[26] C. Cholsuk, A. Zand, A. C،akan, and T. Vogl, hBN 缺陷数据库：六方氮化硼中色心的理论汇编，TheJour-nal of Physical Chemistry C **128**，12716 (2024)，https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.4c03404。[27] 采用光纤集成六方氮化硼的室温单光子源，Journal of PhysicsD: Applied Physics**50**，295101 (2017)。[28] P. Ji, C. Qian, J. J. Finley, and S. Yang, 适用于二维异质结构且厚度不敏感的光子分子纳米腔，Nanophotonics**12**，3501 (2023)