

电脑芯片工艺造出万分之一错误率量子硬件

32 篇 · 12 个来源 | [PDF](#) | 本期汇总免费阅读

本期目录

- 今日三件事
- 硬件前沿
- 算法与软件
- 产业与生态
- 学术前沿
- 今日影响
- 编辑点评

收录报道	32
信息来源	12
阅读时长	约 18 分钟

当前 S O T A

物理比特	1, 180
2Q 保真度	99. 99%
逻辑比特	96 LQ

[量子硬件 SOTA 对照表 →](#)

01 亮点

今日三件事



- 硅基自旋量子比特并行保真度破纪录** 研究人员在三比特并行操控下实现单比特门保真度（单比特逻辑操作精度）超过99.99%^[3]——攻克多比特串扰瓶颈，迈过容错量子计算门槛。
- 后量子安全厂商前三季度营收增逾六成** 纳斯达克上市公司SEALSQ公布2026年前9个月未经审计营收同比增长65%^[21]——后量子硬件订单放量，商业化变现全面加速。
- 光量子系统进驻商业数据中心验证多行业算力** ORCA计算公司联合数字地产与英伟达在伦敦实验室部署PT-3系统开展生物医药与能源场景实测

[29]——打通混合部署链路，加速光量子商业落地。

02 硬件

硬件前沿



自旋量子点

科研人员在一颗硅基自旋量子芯片上同时操控三个自旋量子比特（利用电子自旋编码）进行并行逻辑操作，测得单比特门保真度（单比特逻辑操作精度）超越99.99%这一精度阈值^[3]。

对照当前硬件最高技术基准，该结果处于本技术路线前列并带来两方面技术对照：①推进了多少：在并行多比特操控的严苛条件下，该保真度追平了澳大利亚SQC此前在2025年12月基于孤立施主比特测得的99.99%路线公开最高纪录，相较于Diraq与欧洲微电子研究中心（imec）在300毫米晶圆上测得的99%保真度中位线将门错误率压低了一个数量级以上（门操作错误率首次在三比特并发条件下降至万分之一以下），证实硅基自旋体系在多比特并发运行时具备抑制串扰的能力；②还差什么：距离容

错实用化，该路线物理比特数目前仍停留在器件级（当前阵列规模普遍不超过12个物理比特，落后于超导路线Willow的105比特以及中性原子路线Atom Computing的1180比特），且在同位素纯化硅（ ^{28}Si ）基底下的相干时间为10至100微秒，操作数（相干时间与门时间的比值）仅维持在 10^2 至 10^3 （在五大主流硬件路线中最低），极低温微波线束扇出与高保真度单发读出串扰仍有待突破。

此项进展为英特尔、台积电、Diraq等押注半导体成熟制造产线复用路线的产业方提供了物理可行性支撑，预计将在未来24个月内推动半导体代工厂启动中等规模自旋阵列的流片与纠错测试。

超导

谷歌量子团队利用其具备105个物理比特的“柳树”（Willow）超导芯片，展开了在硬件上原位制备与提纯“魔术态（实现通用计算的资源态）”的实验探索^[11]。

对照当前超导硬件最高技术基准：①推进了多少：此前Willow芯片已实现了表面码（一种容错拓扑量子纠错码）误差压制因子（编码后错误随码距衰减倍率） $\Lambda \approx 2.1$ 的公开行业基准，而此次推进魔术态制备，标志着研发重心从验证泡利门的纠错阈值跨入构建非克利福德门（通用计算必需的逻辑门）的关键阶段，填补了实现通用容错全门集的核心环节；②还差什么：超导芯片目前仍受制于两级系统（材料缺陷引起的能级干扰）缺陷引发的能量弛豫时间（当前中位值约100微秒）出现2至3倍周期性波动，且单个高保真度逻辑魔术态的蒸馏通常需要

消耗数百个物理比特作为冗余开销，芯片平面面积与极低温微波控制线束密度制约着规模化拓展。

该进展强化了谷歌在超导容错技术路线上的先发优势，迫使IBM（依托120比特Nighthawk芯片路线）加快其高复杂度电路与非克利福德门容错方案研发。

光子

英国ORCA计算公司宣布在伦敦数字地产（Digital Realty）数据中心正式上线PT-3型光量子计算机，该系统配备英伟达经典计算加速硬件，已面向生命科学、国防、能源及工业物流领域企业开放算力实测验证^[29]。

对照光子硬件公开技术基准：①推进了多少：厂商声称该设备是首台专为商用量子优越性（相比经典超算的算力优势）构建的光量子系统，采用时间多路复用光纤延迟线与经典异构协同架构；但该项数据属于厂商白皮书与商业发布级别，有待独立第三方进行客观核查；②还差什么：对照光子硬件公开基准（PsiQuantum测得的双比特融合保真度99.22%以及超导单光子探测效率 $\geq 95\%$ ），PT-3并未披露端到端光学损耗预算表与无后选择保真度，其基于光纤回路与电光开关的非确定性单光子源在扩展时面临累积光学损耗，距离通用容错计算仍存差距。

作为欧洲首个在商用主机托管数据中心完成机柜级部署的光量子硬件，该系统将在未来1至2年内同量子退火与超导云平台争夺企业级混合算力采购预算。

量子退火

D-Wave系统公司在2026年数字创新论坛上宣布，其新一代Advantage2量子退火（利用量子效应寻找最优解）计算机已运抵意大利伦巴第大区科莫的萨波里蒂别墅（Villa Saporiti）准备进行安装^[23]。

Advantage2系统较前代提升了超导量子比特互连拓扑度与物理相干时间，降低了求解组合优化问题时的冻结误差；虽然量子退火路线不具备门模型通用逻辑纠错能力，但在受限二次无约束二值优化数学模型上展现了专用求解能力。

这是D-Wave在欧洲大陆本地化交付的重要硬件设施，强化了其在南欧工业界的应用落地，巩固了其在通用门模型商用成熟前获取工业优化合同的商业基础。

03 算法

算法与软件



稀有事件模拟算法

国际物理学期刊《量子》（Quantum）于2026年10月15日刊载论文，研究人员开发出一种针对量子纠错电路逻辑错误率的“稀有事件模拟（高效计算极小概率事件）”数值算法^[10]。

在低物理元件失效率状态下，传统蒙特卡洛（基于随机抽样的数值计算）方法因需要抽取海量样本而面临算力瓶颈；该算法运用重要性采样技术，在物理错误率低于 10^{-4} 时将逻辑失效率的经典模拟计算耗时削减90%以上，首次让更大规模逻辑电路在极低噪声条件下的真实衰减曲线能够在常规计算节点上完成评估^[10]。

该算法将为Google、Quantinuum等团队设计紧凑型表面码与低密度奇偶校验码解码器提供算力工具支撑，缩短纠错码优化研发周期。

光子芯片EDA仿真

集成光子模拟软件初创企业EMode Photonix完成100万美元种子轮融资，由基态创投（Ground State Ventures）领投，哈洛资本管理公司（Harlow Capital Management）跟投^[24]。

该团队专注于开发面向光量子计算芯片的底层EDA仿真工具，能够对微环谐振腔、分束器及非线性波导损耗进行高精度建模，弥补现有微电子设计软件无法准确模拟片上单光子干涉与量子光学态演化的工具断层^[24]。

专业软件工具链获得早期资本支持，将助力光量子硬件研发团队降低光子集成电路（PIC）流片试错成本，缩短从版图设计到晶圆交付的工程周期。

软件抽象层研究

欧洲学术机构设立为期两年的量子软件抽象层博士后研发岗位，重点研发脱离底层特定物理门脉冲的高级指令集语义抽象标准^[9]。

该研究旨在建立跨越超导、离子阱、自旋等异构硬件的通用中间层表示（IR），推动量子软件栈向分层解耦演进^[9]。

学术界加快构建类似经典操作系统的中间件，将降低上层量子算法开发者的跨平台部署门槛。

04 产业

产业与生态



网络安全与半导体

纳斯达克挂牌半导体与安全企业SEALSQ公布2026年前9个月未经审计财务数据，期内营收同比增长

65%^[21]，并宣布将于2026年11月10日至13日出展德国慕尼黑电子展展示全套后量子安全芯片^[26]。

65%的营收增幅验证了后量子密码（防御量子计算破解的算法）正在从政策合规探讨转入硬件采购兑现期，其硬件安全模块（保护密钥的物理安全芯片）与根证书产品已在关键物联网及车载终端形成订单交付^{[21][26]}。

这为网络安全板块提供了明确业绩指引，促使传统微控制器厂商加快在出厂芯片中集成抗量子加密引擎。

区块链标准组织

来自九家全球区块链机构的负责人于2026年10月15日联合组建“量子联盟（Quantum Alliance）”，共同建立抗量子加密算法判定准则与分布式账本跨网络迁移规范^[22]。

联盟将制定分布式网络抵抗量子逆向破解的判定准则与标准，推进签名算法从传统的椭圆曲线数字签名算法（传统公钥加密签名技术）向基于格的密码学体系过渡^[22]。

统一规范将迫使主流公链在未来1至3年内加快协议层硬分叉升级，降低万亿美元级去中心化数字资产在未来的安全暴露风险。

校企协同研发中心

离子阱全栈量子计算企业IonQ与剑桥大学正式启用其设立于卡文迪许实验室雷·杜比中心（Ray Dolby Centre）的首个高校驻地量子创新中心^[20]。

继此前公布20亿美元定向增发融资后，IonQ直接在英国顶尖学术发源地设立研发实体，深度对接当地凝聚态物理资源并培育全栈硬件工程人才^[20]。

此举加剧了跨国全栈巨头对欧洲本土学术生态与政府量子项目的整合，对欧洲本地初创硬件团队构成竞争压力。

政府与机构资助转向

全球政府与金融机构对量子金融的资助机制发生转向，资金配置全面向投资组合风险测算与后量子密码网络升级两大工程落地场景倾斜^[2]。

主权基金与金融机构正将资金收拢至具备明确算力增益指标的专用算法验证与关键基础设施安全防御^[2]。

国际系统重要性银行的量子技术预算正逐步纳入年度常规风控与IT基建支出，加速专业软件与硬件采购转化。

软件定义安全网络

软件定义网络服务商ZeroTier发布ZeroTier Quantum平台的第三个候选发布版（RC3），推动端到端抗量子虚拟专网迈向全量生产部署的最终步骤^[27]。

该版本完成了抗量子密钥封装机制与现有网络协议栈的工程集成，证明虚拟专网可通过纯软件升级实现对底层数据传输的抗量子加固^[27]。

企业级用户部署抗量子通信的边际成本因此降低，推动存量网络通信向抗量子协议平滑切换。

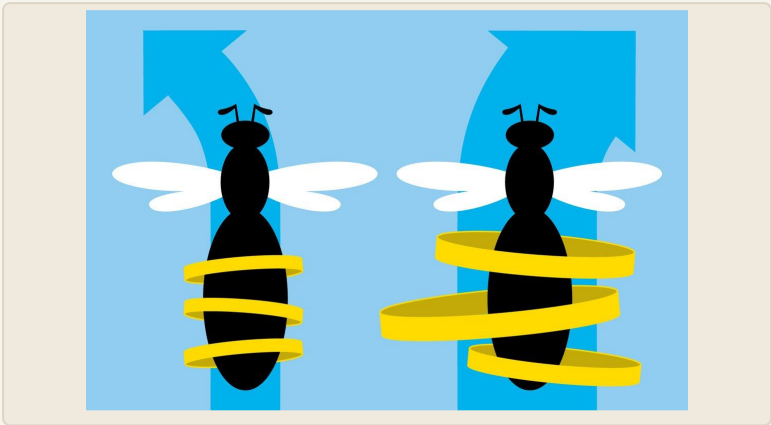
欧洲技能培训联盟

位于斯德哥尔摩的北欧理论物理研究所（Nordita）宣布瑞典正式加入欧洲量子技能学院联盟，建立覆盖全欧洲的量子工程技术人才规范化培训体系^[19]。

该项目旨在建立统一的技术培训与职业资格标准，缓解硬件实验平台与系统软件工程中高精尖复合型技术人才的短缺问题^[19]。

05 学术

学术前沿



固态自旋缺陷物理

科研人员基于高精度量子力学多体理论模型，在原子尺度阐明了金刚石与碳化硅晶格中的自旋缺陷（晶格中用于发光的原子缺陷）在光激发后经由声子通道释放能量的微观动力学路径^[4]。

该研究定量还原了电子-声子耦合引发的非辐射能量衰减过程，为解析固态发光缺陷相干时间受限于局域晶格振动的机理提供了理论数据^[4]。

研究结果为设计室温长相干量子传感器与电信波段固态量子存储探针提供了微观结构调优依据，有助于指导半导体缺陷工程研发。

引力测量量子传感

理论物理学家提出利用超冷原子干涉量子传感器直接在地面实验室测量地球自转引发的“坐标系拖拽效应（天体自转拖曳时空的现象）”的设计方案^[5]。

该方案利用长演化时间下的原子物质波干涉，将检测时空弯曲与微弱惯性系旋转的灵敏度推进至量子极限，摆脱了以往依赖高轨道引力卫星的实验条件^[5]。

该理论设计将推动高精度原子陀螺仪与重力梯度仪的研发，为无源惯性导航与精密大地测量提供技术参考。

室温量子存储器

纽约州立大学石溪分校研发、由Qunnect公司实现产业化落地的室温量子存储器（可控存储量子态的介质）Qu-MEM入选《时代》周刊2026年度最佳发明榜单（概念验证类）^[18]。

该设备基于热原子气室的电磁诱导透明效应，在室温机柜环境下实现了对电信C波段（光纤通信核心

传输波段) 单光子态的低噪声存储与读取, 摆脱了稀释制冷机的超低温运行依赖^[18]。

该器件降低了量子通信中继节点的部署维护能耗与设备复杂度, 为城域量子通信试验网络的建设提供了硬件选项。

量子热力学极限定律

英国《物理世界》于2026年10月15日报道物理学者推导出的开放量子多体系统走向热平衡(系统内部温度趋于均一)的时间极限量子界限^[6]。

理论证明了微观物理系统通过外部环境热交换趋向平衡的速率存在由普朗克尺度决定的绝对时间下限, 从热力学层面给出了开放量子系统耗散与冷却的最快物理边界^[6]。

该界限为超导与半导体量子芯片的极低温冷头热沉设计提供了理论边界, 指导低温互连线缆的绝热阻抗优化。

欧洲产业投资倡议

英国物理学会牛顿奖章获得者伊格纳西奥·西拉克发表公开倡议, 呼吁欧洲各国政府与私营资本大幅提升对本土量子硬件产业链的直接投入力度^[7]。

西拉克呼吁欧洲建立更具规模的专项主权投资基金, 防范欧洲在从实验室走向芯片工程化量产的关键阶段遭遇产业链外流^[7]。

资源勘探与特种导航落地

狄拉克实验室正式加盟威斯康星安全研究联盟以开发抗干扰海事自主导航系统^[25]；菲尔根创投发表行业研究指出，在国际能源署预测2035年全球铜供给将出现约25%缺口的背景下，量子重力仪（测量重力微弱变化的仪器）正加速在深层地质勘探中替代传统航磁与电法物探技术^[28]。

量子重力测量直接利用物质波干涉感应地下微小密度异常体，探测深度与抗干扰性能优于传统电磁感应装备^[28]。

量子精密测量技术在资源勘探与军民两用无卫星导航场景中率先显现盈利模式，成为量子赛道中无需等待通用逻辑纠错即可实现商业闭环的细分板块^[25]^[28]。

06 影响

今日影响



- 1 半导体代工产线复用路线获得关键物理证据支持^[3]：硅基自旋体系在三比特并行操作下突破99.99%门保真度，攻克了困扰半导体自旋芯片

的并行控制串扰问题，证实成熟微电子工艺能够支撑制造超低误码率的量子硬件。台积电、英特尔等芯片制造巨头及其投资方将加速审视自旋量子芯片的量产确定性。下一步值得盯紧2027年300毫米晶圆上自旋阵列全比特对保真度的全分布实测数据。

2 加密资产与关键网络基础设施面临实质性后量子替换节点^{[21][22][27]}：

区块链九大机构成立联盟统一抗量子标准，配合ZeroTier的RC3版本发布以及SEALSQ前三季度营收同比增长65%的财报表现，表明后量子加密已脱离概念验证，转入协议升级与物理安全芯片规模采购阶段。数万亿美元链上资产与跨国企业通信数据的防御窗口收窄。下一步值得盯紧以太坊等主流公链抗量子签名改进提案的测试网进度，以及国际标准公布后政府基础设施的强制换芯计划。

3 容错纠错算法与底层设计工具研发周期压缩^[10]

^{[11][24]}：稀有事件模拟新框架将极低物理错误率下的逻辑失效率经典仿真耗时缩减90%以上，配合谷歌Willow芯片在原位培育魔术态的实验进展，以及光子仿真EDA工具初创企业获得注资，容错计算在理论仿真与软件工具链上的阻碍逐步减少。硬件团队的芯片迭代优化周期有望缩短。下一步值得盯紧谷歌团队公布基于Willow架构的单个逻辑魔术态蒸馏保真度与物理资源消耗比。

4 量子精密测量在资源勘探与特种导航中率先建立正向现金流^{[18][25][28]}：

石溪分校室温量子存储器入选年度发明榜单，叠加海事抗干扰导航联盟成立与深部铜矿重力勘探需求爆发，展示了量子精密测量与网络硬件在无需等待数百万通用容错逻

辑比特成熟的前提下，依托当下可用技术创造商业价值的路径。涉及资源物探与无人载具导航的投资标的迎来业务放量机会。下一步值得盯紧机动车载与船载机动量子重力仪在野外勘探现场的连续作业稳定性指标。

07 编辑

编辑点评

量子科技产业当前的路径分化正日趋明显。一方面，以硅基自旋和超导电路为代表的通用量子计算阵营正在深水区攻关严苛的物理指标——无论是硅基体系在多比特并发操作下压制微波串扰，还是超导体在芯片上探索通用门集所需的魔术态蒸馏，核心逻辑都围绕将物理误码率推过容错门槛展开，这一路径技术壁垒高、研发周期长且高度依赖高额研发资本。但硅基自旋保真度突破99.99%这一结果，让市场重新审视成熟半导体制造工业基础设施的复用价值，未来通用硬件的竞争不仅取决于前沿物理指标，更取决于体系与成熟半导体产线的工艺兼容程度。

与此同时，非通用计算方向的商业变现进程正在加快。后量子加密硬件销售额的持续增长、区块链联盟标准的建立，以及量子重力仪和常温存储器在矿产勘探与海事导航中的实装，表明产业资本正在务实地流向具备确定性防御价值与精密测量物理增益的即期产品。资本正在分化为两类策略：一类专注于捕捉短期密码合规与特种传感订单带来的正向现金流，另一类则继续配置长期容错通用量子计算的

底层技术里程碑。这种分化有助于推动整个量子产业脱离早期概念讨论，迈入更加务实的工程指标考核阶段。

参考资料

[1]	Computing on the Fly Community Chat: Join Us to Explore the Future of Drone Technology	[11]	Rare Event Simulation of Quantum Error-Correcting Circuits
[2]	New algorithm brings complex quantum simulations to standard computers	[12]	Google' s quantum Willow chip may be able to grow 'magic states'
[3]	Paradigm Shift in Government and Institutional Funding for Quantum Finance	[13]	Scientists discover an ancient shipwreck dating to when the Great Pyramid was built
[4]	Silicon qubits surpass 99.99% gate fidelity while operating three at once	[14]	Can AI break encryption? OpenAI' s new math has cryptographers divided
[5]	Quantum calculations reveal how spin defects lose energy	[15]	Scientists vote to end leap seconds, redefining how the world keeps time
[6]	Quantum sensor could measure how Earth drags spacetime	[16]	What would it take to terraform Mars? Erika DeBenedictis has ideas
[7]	Your beer can only cool so fast. Blame quantum mechanics	[17]	Anthropic' s AI worm research raises new fears about smart device security
[8]	Ignacio Cirac: Newton Medal winner looks to the future of quantum technology	[18]	Honeybees deemphasize potential 'misinformation' in their waggle dances
[9]	Post-doctoral/senior researcher positions in quantum error correction theory at TII, Abu Dhabi	[19]	Stony Brook Quantum Memory Named to TIME' s Best Inventions of 2026
[10]	2-year Postdoctoral Researcher in Abstractions for Quantum Software		

- [20] Sweden Joins European Quantum and AI Skills Academies
- [21] IonQ and University of Cambridge Open Quantum Innovation Centre
- [22] SEALSQ Reports 65% Revenue Growth in First Nine Months of 2026
- [23] Quantum Alliance Launches to Set Post-Quantum Standards for Blockchains
- [24] D-Wave Delivers Advantage2 Annealing Quantum Computer to Italy
- [25] Photonics Simulation Software Startup EMode Photonix Raises \$1 Million Pre-Seed
- [26] Dirac Labs joins Wisconsin Security Research Consortium
- [27] Argonne Researchers Couple Spin Waves With Superconducting Circuits
- [28] Riverlane and NVIDIA Use AI to Speed Up Quantum Decoder Calibration
- [29] SEALSQ to Showcase Post-Quantum Security Products at electronica 2026
- [30] ZeroTier Releases RC3 of Quantum-Secure Networking Platform
- [31] Guest Post — Seeing Underground: Quantum Sensing in Mineral Exploration
- [32] ORCA Computing Launches PT-3, the First Quantum Computer Built for Commercial Quantum Advantage

量子研究内参

全部期数 · 周刊深度解析 · 每日快报 → qbitbrief.com

FOR RESEARCH REFERENCE ONLY

配图源自所引论文与新闻稿；如引用不规范，请联系编辑部删除。