光子盒研究院
QUANTUMCHINA

2025年全球量子计算新进展深度分析



2025/07

Contents

目录

声明 2

I. 摘要 3

II. 引言 4

2.1 2025年量子计算概览：年度技术焦点 4

2.2 研究目的与范围 4

III. 2025年全球量子计算重大进展 6

3.1 PsiQuantum的光子量子计算平台 7

3.2 微软的拓扑量子比特 9

3.3 D-Wave的超导量子退火处理器 12

3.4 用于硅MOS型电子自旋量子比特的CMOS芯片控制 15

3.5 无线太赫兹低温互连技术 18

3.6 可互换超导量子比特器件的初级网络 20

3.7 电子-光子量子片上系统 22

3.8 超导量子计算机的扩展挑战 24

IV. 结论 26

参考链接 27

声明

01 本报告体现的内容和阐明的观点力求独立、客观，本报告中的信息或所表述的观点均不构成投资建议，请谨慎参考。

02 本报告旨在梳理和呈现2025度内全球与量子细分技术和产业领域发生的重要事件，涉及数据及信息以公开资料为主，以及对公开数据的整理。并且，结合发布之时的全球经济发展状态，对短期未来可能产生的影响进行预判描述。

03 本报告重点关注2025年度量子计算细分行业发生的相关内容，以当地时间报道为准，以事件初次发布之时为准。对同一内容或高度相似内容的再次报道，若跨年度，不视为2025年发生的重要事件。

04 本报告版权归光子盒所有，其他任何形式的使用或传播，包括但不限于刊物、网站、公众号或个人使用本报告内容的，须注明来源（2025年全球量子计算新进展深度分析 [R]. 光子盒. 2025.07）。本报告最终解释权归光子盒所有。

05 任何个人和机构，使用本报告内容时，不得对本报告进行任何有悖原意的引用、删减和篡改。未经书面许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制、发表、印刷等。如征得同意进行引用、转载、刊发的，需在允许范围内。违规使用本报告者，承担相应的法律责任。

06 本报告引用数据、事件及观点的目的在于收集和归纳信息，并不代表赞同其全部观点，不对其真实性负责。

07 本报告涉及动态数据，呈现截至统计之时的情况，不代表未来情况，不够成投资建议，请谨慎参考。

I.摘要

本报告旨在深入分析2025年全球量子计算领域取得的重大进展。2025年被联合国定为“国际量子科学与技术年”，这凸显了该领域自20世纪80年代理论起源以来的快速发展。报告详细审视了横跨光子、拓扑、超导和硅基电子自旋量子比特等多样化量子比特模式的关键突破，以及量子互连和控制系统方面的重大进展，对每项成就都进行了技术细节、创新点及其对可扩展性这一核心挑战的影响的深入剖析。此外，报告还探讨了量子计算在扩展过程中面临的巨大工程和环境障碍，将其与欧洲核子研究中心（CERN）或激光干涉引力波天文台（LIGO）等大型科学设施的建设相类比，强调了产业界与学术界持续合作的日益重要性。

本年度的进展表明，尽管研究方法各异，但整个领域正趋向于解决量子系统可扩展性的共同目标。这种趋同的焦点揭示了，当前量子计算发展的主要驱动力在于如何将单个高性能量子比特扩展至数百万个，并使其可靠地协同工作，而非仅仅提升单个量子比特的性能。

II.引言

2.1 2025年量子计算概览：年度技术焦点

2025年是联合国量子信息科学与技术年，对量子计算领域而言是极具里程碑意义的一年，这一殊荣彰显了自20世纪80年代初量子计算概念首次提出以来，以及20世纪90年代量子处理器超越传统处理器的巨大潜力日益明朗化以来，该领域所取得的飞速发展 。近年来，量子硬件的实际形态已逐步显现，学术界和工业界的研究团队在过去一年中展示了多项强大的成果，极大地激发了人们对这项技术的兴奋和期待。自2025年1月以来，这种快速发展势头有增无减。

量子计算从最初的理论构想发展到如今具备强大演示能力的硬件，标志着该领域已从纯粹的概念或小规模实验阶段迈向了更成熟的阶段。当前对量子计算的期待已不再仅仅基于抽象的理论前景，而是植根于日益强大的硬件能力，这也预示着量子技术正处于发展历程中的一个关键时期，即从基础研究向工程实现和实际应用加速转变。

2.2 研究目的与范围

本报告旨在对2025年1月以来全球量子计算领域的新进展进行详细分析，主要依据近期发表于《自然-电子学》(Nature Electronics)上的一篇社论及其引用的研究文献。报告范围涵盖对每项重大成就的技术基础、创新之处及其对量子领域（特别是对量子系统持续面临的可扩展性挑战）更广泛影响的深入探讨。

III. 2025年全球量子计算重大进展

01 PsiQuantum的光子量子计算平台

02 微软的拓扑量子比特

03 D-Wave的超导量子退火处理器

04 用于硅MOS型电子自旋量子比特的CMOS芯片控制

05 无线太赫兹低温互连技术

06 可互换超导量子比特器件的初级网络

07 电子-光子量子片上系统

08 超导量子计算机的扩展挑战

2025年全球量子计算重大进展

2025年，全球量子计算领域涌现出多项突破性进展，涵盖了从新型量子比特制造平台到提升系统可扩展性的互连技术。下表总结了本年度的主要成就：

图表 2025年1月至7月全球量子计算领域的主要技术成就

月份	研究团队/公司	核心技术/突破	主要影响/意义
2月	PsiQuantum	可制造的光子量子计算平台	为实用级、容错量子计算机提供可扩展路径
2月	微软	拓扑量子比特 (Majorana 1)	提出一种固有抗环境干扰的量子比特，但引发社区质疑
3月	D-Wave	超导量子退火处理器	在神经网络训练中展现优于经典模拟器的性能
5月	麻省理工学院和康奈尔大学Jinchen Wang团队	无线太赫兹低温互连技术	显著降低量子处理器与控制器之间的数据传输热负荷，提升可扩展性
6月	悉尼大学、Diraq、新南威尔士大学联合团队	毫开尔文温度下CMOS芯片控制硅MOS型电子自旋量子比特	验证低温CMOS集成控制自旋量子比特的可行性，解决I/O瓶颈
7月	伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校Wolfgang Pfaff团队	可互换超导量子比特器件的初级网络	通过模块化架构和高效互连实现超导量子处理器可扩展性
7月	加州大学伯克利分校、波士顿大学和西北大学Danielius Kramnik团队	电子-光子量子片上系统	在商用CMOS代工厂制造，实现量子光源的片上稳定和可扩展生产
7月	谷歌量子人工智能的Anthony Megrant和Yu Chen	超导量子计算机的扩展挑战分析	强调扩展至容错量子计算的巨大工程挑战及产学研合作的重要性

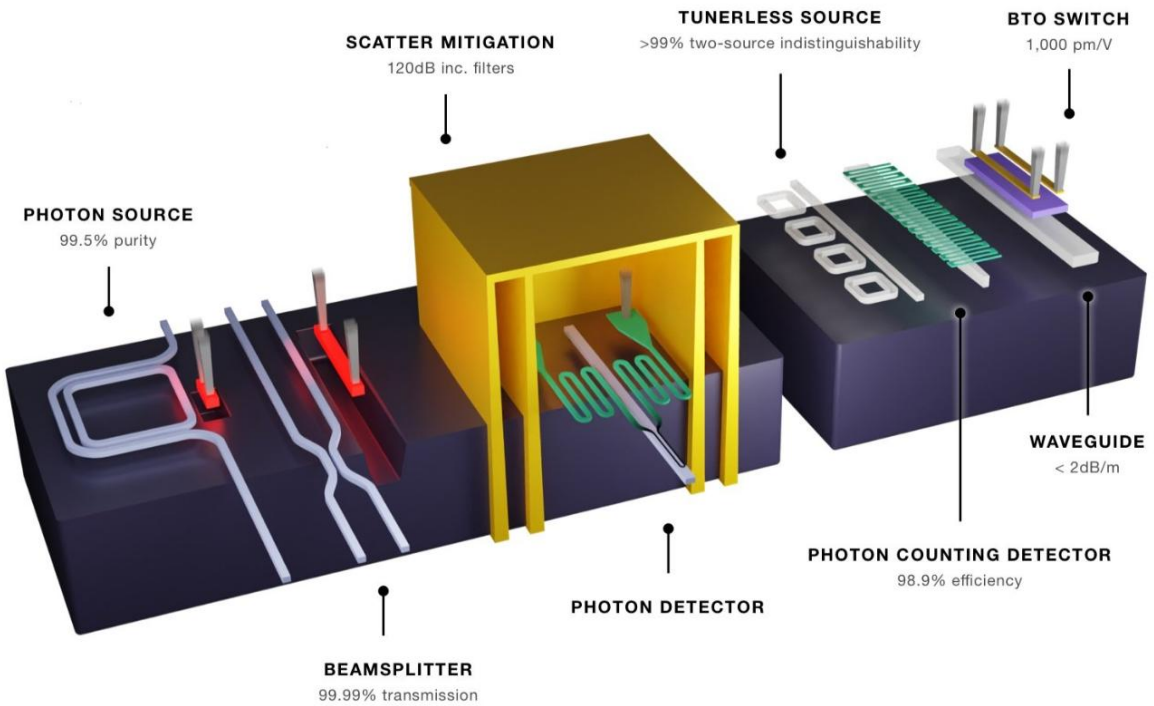
光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2025.7

01 PsiQuantum的光子量子计算平台

2025年2月，PsiQuantum公司在《自然》(Nature)杂志上发表了一项突破性研究，报告了一种可制造的光子量子计算平台。这项核心成果围绕其Omega 芯片组展开，该芯片组专为实用级量子计算设计，将单光子量子比特与电信级硅光子技术相结合。PsiQuantum称这种集成对于克服显著的可扩展性挑战和实现高保真量子互连至关重要，而后两者都是构建百万量子比特系统所必需的要素。

该平台的所有光子组件均展现出“超越现有技术水平的性能”，包括高保真量子比特操作以及直接、长距离的芯片间量子比特互连。这种互连被视作实现规模化的关键推动因素，这对于许多其它的平台而言一直是一项难以逾越的挑战。PsiQuantum的方法着重于通过光子学路径实现大规模、容错量子计算机的清晰路线图，同时利用现有半导体制造基础设施来加速规模化进程。

图表 Omega芯片组横截面



来源：https://www.psiquantum.com/news-import/omega

这项平台的核心创新在于其“可制造性”，这标志着量子计算领域正从基础研究向大规模量子系统的实际部署进行战略性转变。PsiQuantum正在积极与政府合作，在布里斯班和芝加哥建立量子计算中心，表明其致力于工业规模实施的决心。近期该公司的企业公告还包括与林德工程公司合作建设用于全球首个实用级量子计算机的低温工厂，以及与美国空军研究实验室（ARFL）签订提供新型量子芯片能力的合同。

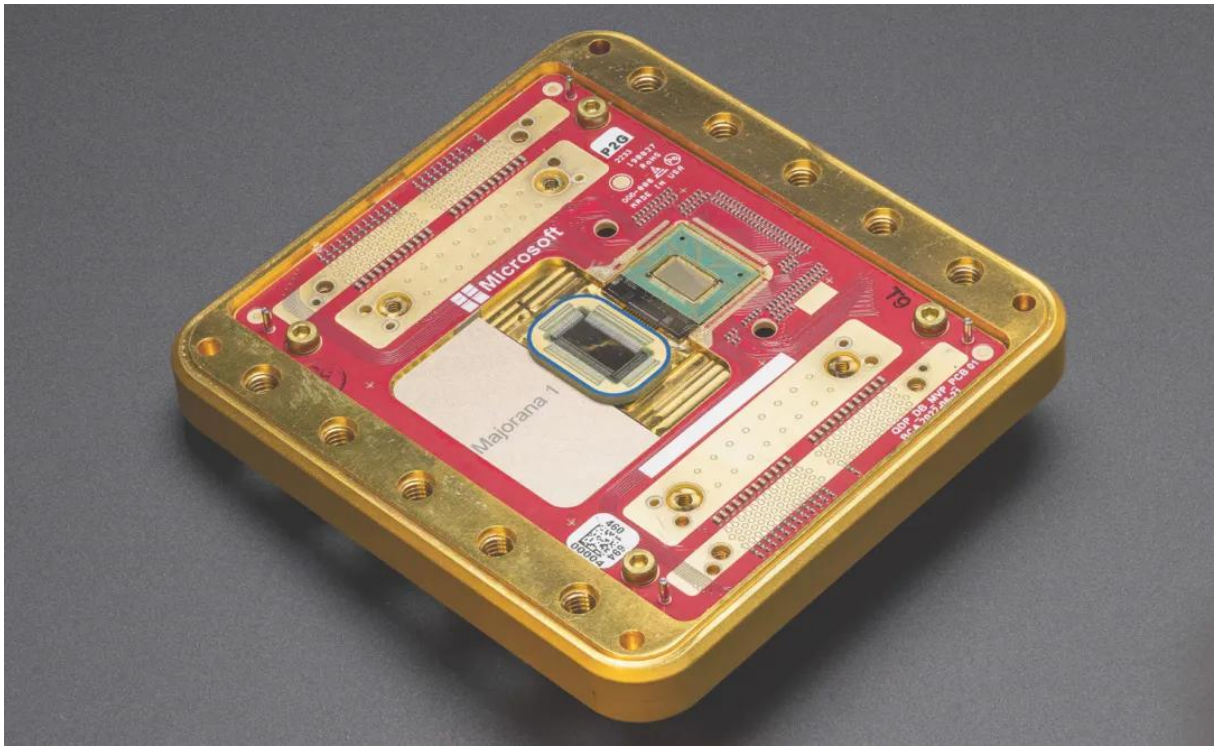
为实现可扩展的量子计算所需的互连高密度和低温可靠性，该平台采用了先进的封装解决方案，例如电气集成电路（EIC）和光子集成电路（PIC）的3D集成、光学输入/输出的光纤耦合、倒装芯片互连、2.5D中介层以及晶圆级扇出工艺。通过有效利用现有工业基础设施，这些技术极大地促进了可制造性。

凭借其固有的可制造性以及利用现有半导体制造工厂的能力，光子学为实现容错量子计算提供了一条充满前景且务实的途径。这种方法代表了一种解决复杂物理问题的工程驱动型方案，体现了量子硬件开发领域日益成熟的态势。

02 微软的拓扑量子比特

2025年2月，微软通过新闻稿宣布其“Majorana 1”硬件设备成功创建了拓扑量子比特。Majorana 1是微软的首个量子计算芯片，由砷化铟-铝混合材料制成，能在极低温度下展现超导性。微软声称该设备显示出存在边界马约拉纳零模的信号，如果得到明确证实，这些模式将成为拓扑量子比特乃至大规模拓扑量子计算机的基础。该设备设计可容纳八个量子比特。

图表 Majorana 1



来源： https://news.microsoft.com/source/features/ai/microsofts-majorana-1-chip-carves-new-path-for-quantum-computing/

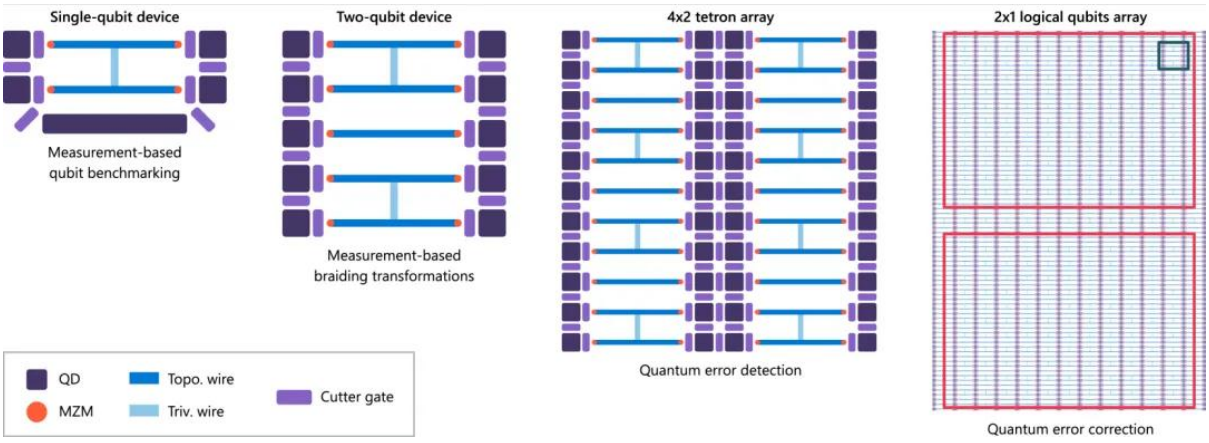
微软引入了“拓扑导体”一词来描述Majorana 1中使用的这种新型材料，将其定义为一类能够实现拓扑超导性的材料，这种材料在理论上被普遍认为能有效促进马约拉纳零模的制备与调控。微软在内部白皮书中指出，基于拓扑导体的架构将有助于实现“编织”操作，这是构建容错量子逻辑的关键操作。

基于马约拉纳费米子的量子比特被称为拓扑量子比特，拓扑量子比特的概念最早于1997年提出，为解决传统量子比特（如基于超导电路或离子阱的量子比特）所面临的稳定性和可扩展性挑战提供了极具前景的解决方案。马约拉纳费米子是一种准粒子或特殊的物质状态，它对会导致量子计算机出错的环境噪声具有固有抗性。大致来说，这意味着信息（0和1）在空间中分布（编织），使其对噪声（热、电磁干扰等）的敏感性降低。这种拓扑保护有望显著简化量子纠错过程，与现有最先进的方法相比，所需的开销可能减少约十倍 。微软的宏伟目标是使这种架构能够在一个芯片上集成多达一百万个量子比特。

然而，Majorana 1的发布在科学界引发了“一定程度的怀疑”。这种怀疑主要源于微软缺乏明确的公开证据来证实Majorana 1设备明确展现了真正的马约拉纳零模。微软在量子硬件方面的研究成果此前也曾引发争议，如2018年发表于《自然》杂志上一篇备受关注的文章被撤回，以及2017年发表于《自然·通讯》(Nature Communications)上一篇与微软量子芯片相关的论文被质疑存在未披露的数据处理。

微软声称Majorana 1是“世界上第一个由拓扑核心驱动的量子处理单元（QPU）”，但这一说法也存在争议，因为目前公开的硬件演示仅展示了一种读出方法，并未展示任何相干量子处理或逻辑操作。同样，微软新闻稿中“创建马约拉纳粒子”的说法与《自然》论文本身相矛盾，该论文明确指出，测量结果“本身并不能确定通过干涉测量检测到的低能态是否具有拓扑性质”。核心困难在于，在这些设备中，很难可靠地区分拓扑马约拉纳模式和拓扑平凡的安德烈夫模式。

图表 利用tetrons实现容错量子计算的路线图



来源：https://arxiv.org/abs/2502.12252

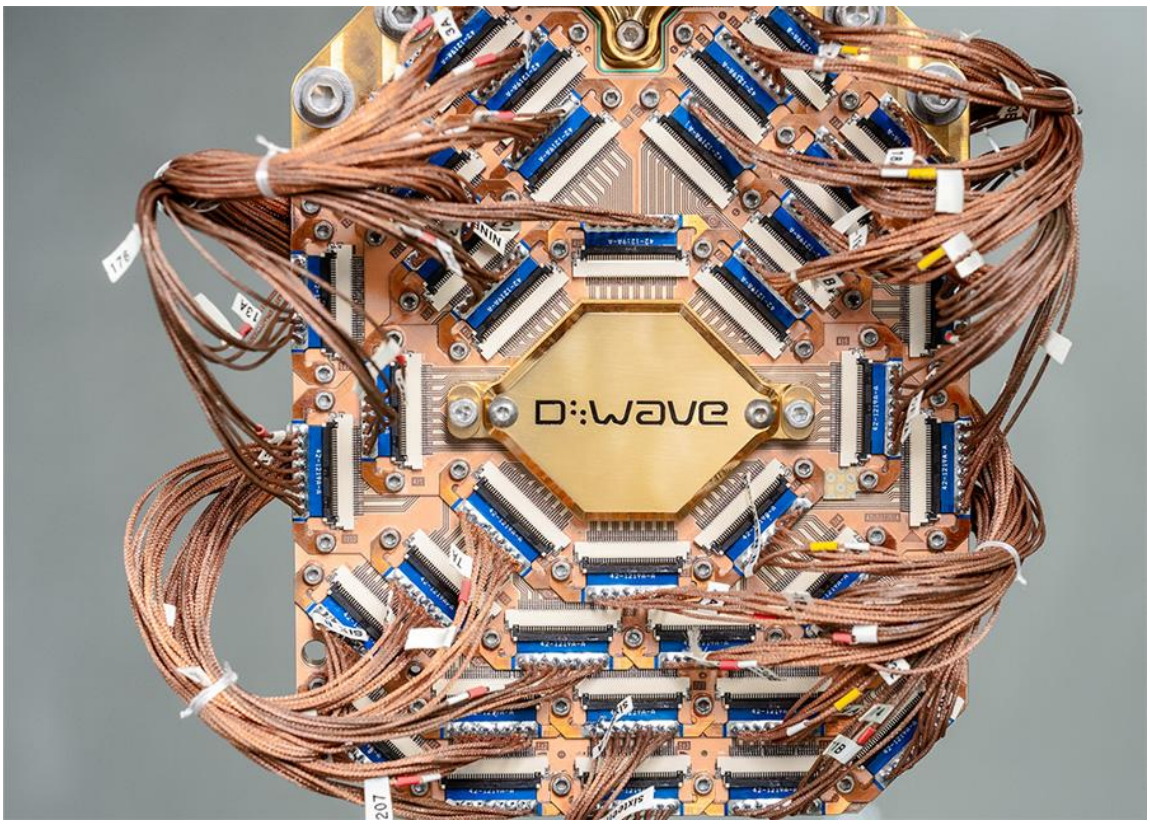
微软关于“创造了一种以前只存在于理论中的新物质状态”的断言也受到质疑，因为此前已有大量基于类似体制的半导体纳米线实验，这些实验理论上也应处于相同的物质状态。根据审稿人的意见，该《自然》论文的真正新颖之处更多在于其方法论证明了射频奇偶校验读出“可以在复杂的环形几何结构中实现”，而非提供了马约拉纳零模更强、更确凿的证据。

拓扑量子计算的高风险性质以及围绕微软声明的诸多质疑，凸显了在量子计算这一高度复杂且受到严格审查的领域中，科学严谨性和透明、可验证证据的重要性。即便是主要行业参与者，在提出突破性主张时也往往面临严格的审查，这表明通往容错量子计算的道路不仅关乎技术突破，更在于通过透明和可重复的结果在更广泛的科学界建立信任与共识。

03 D-Wave的超导量子退火处理器

2025年3月，由D-Wave研究人员领导的团队在《科学》(Science)杂志上报告称，其超导量子退火处理器在性能上超越了现有最先进的经典模拟器。D-Wave的退火量子计算机可以在几分钟内执行磁性材料模拟，而使用超级计算机其精度水平需要近100万年的时间。

图表 D-Wave的量子处理器

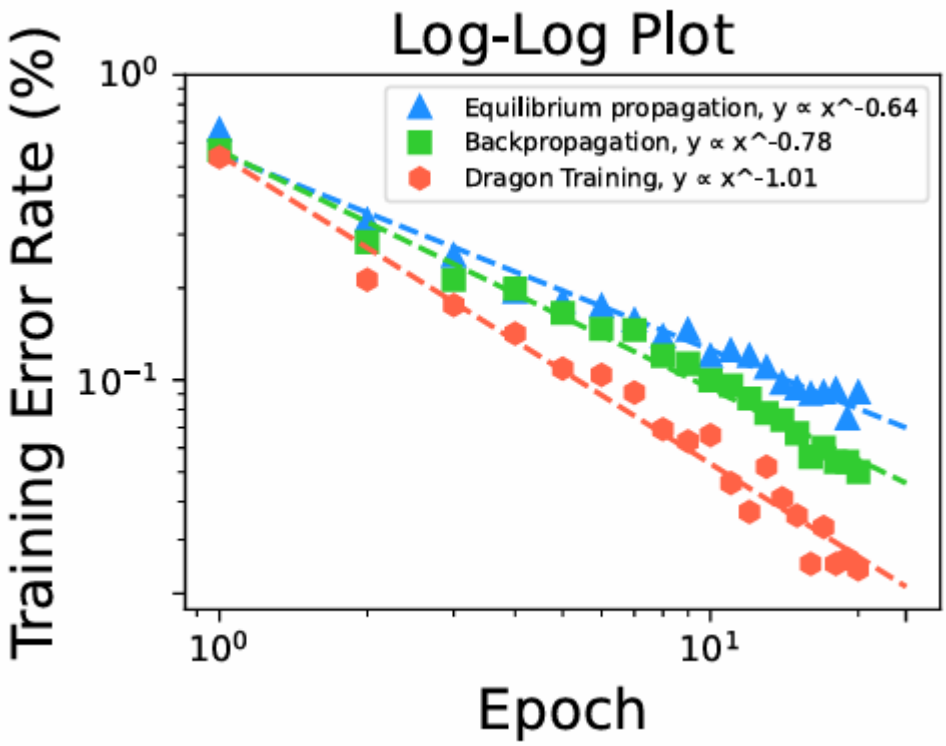


来源：https://www.dwavequantum.com/company/newsroom/press-release/beyond-classical-d-wave-first-to-demonstrate-quantum-supremacy-on-useful-real-world-problem/

2025年6月，D-Wave团队在arXiv发表论文，表示其量子退火平台已展示出“快速高效地训练经典神经网络（NNs）”的能力，训练后的网络随后可部署在传统经典硬件上。神经网络训练过程被概念化为一种动态相变，系统从初始的自旋玻璃态演变为高度有序的训练态，通过有效消除其能量景观中众多不期望的局部最小值来实现。这一过程被生动地比喻为“砍掉不断再生的龙首”。特别是，在D-Wave平台上实现的“龙训练”程序，允许通过一次神经网络参数更新，同时惩罚多个“错误”的能量盆地（即“龙首”）。

与经典反向传播方法相比，这种量子辅助训练方法实现了卓越的性能扩展，表现出显著更高的扩展指数（量子辅助为1.01，而经典反向传播为0.78）。研究人员提出，如果采用一种利用格罗弗算法变体的完全相干量子平台，这种性能优势可能进一步提高至两倍，尽管由于现有相干性限制，这尚未在当前的D-Wave设备上实现。此外，研究表明，即使是规模适中的量子退火器，通过一次只应用于几个层，也能为深度神经网络的训练带来显著益处。D-Wave的量子退火器已显示出能够快速生成与薛定谔方程推导出的解高度匹配的样本。它们在涉及复杂多体量子相互作用的任务中，相对于某些基于张量网络和神经网络的经典模拟技术展现出计算优势，尤其是在经典方法扩展性较差的场景中。

图表 训练方法性能对比（对数-对数坐标）



来源：https://arxiv.org/pdf/2506.05244

D-Wave在论文中用对数-对数坐标系直观展示了不同训练方法的性能比较。上图绘制了训练误差率作为训练周期数的函数，它清晰地展示了“龙训练”（z=1.01）相对于经典反向传播（z=0.78）和平衡传播（z=0.64）的优越扩展指数。量子退火作为一种专门的量子计算范式，与通用门模型量子计算机有所不同。D-Wave的上述工作提供了量化证据，表明量子退火在神经网络训练等特定计算任务中实现了明显的算法

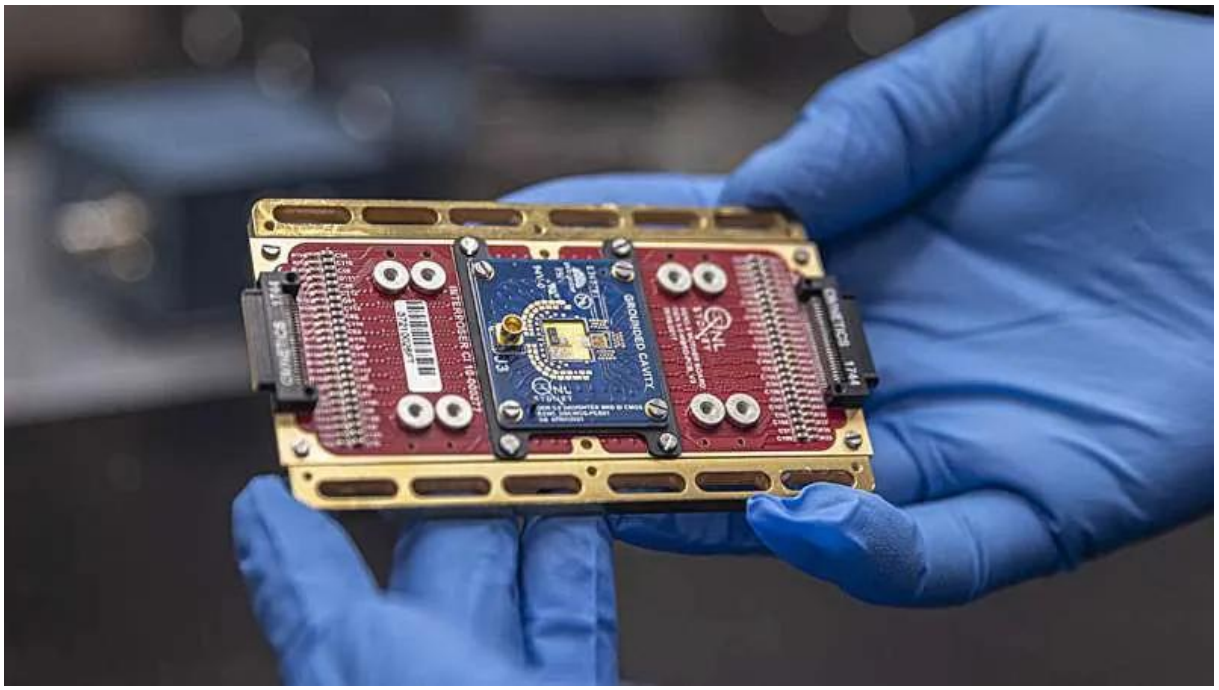
量子加速”。量子辅助方法与经典方法之间扩展指数的直接比较（1.01对0.78）为这种优势提供了令人信服的衡量标准，表明量子退火正在成功地开辟出特定的、有价值的应用领域，在这些领域中，它能显著超越经典方法。诸多进展表明，量子计算的实际影响和量子优势并非完全取决于容错通用量子计算机的全面实现。即使在当前的含噪中等规模量子（NISQ）时代，像退火器这样的专用量子设备也能为优化、机器学习等特定的复杂计算问题提供即时、切实的益处。

04 用于硅MOS型电子自旋量子比特的CMOS芯片控制

2025年6月，来自悉尼大学、Diraq、新南威尔士大学等研究单位的科研团队报告称，一种在毫开尔文温度下运行的互补金属氧化物半导体（CMOS）芯片，可用于控制硅金属氧化物半导体（MOS）型电子自旋量子比特。

硅是实现量子计算极具前景的材料，这主要归因于其与基于成熟CMOS技术的经典控制硬件进行自然集成的内在潜力。该研究特别评估了通过异质集成低温互补金属氧化物半导体（cryo-CMOS）电路控制硅MOS型电子自旋量子比特的性能。

图表 悉尼大学开发的低温量子控制平台

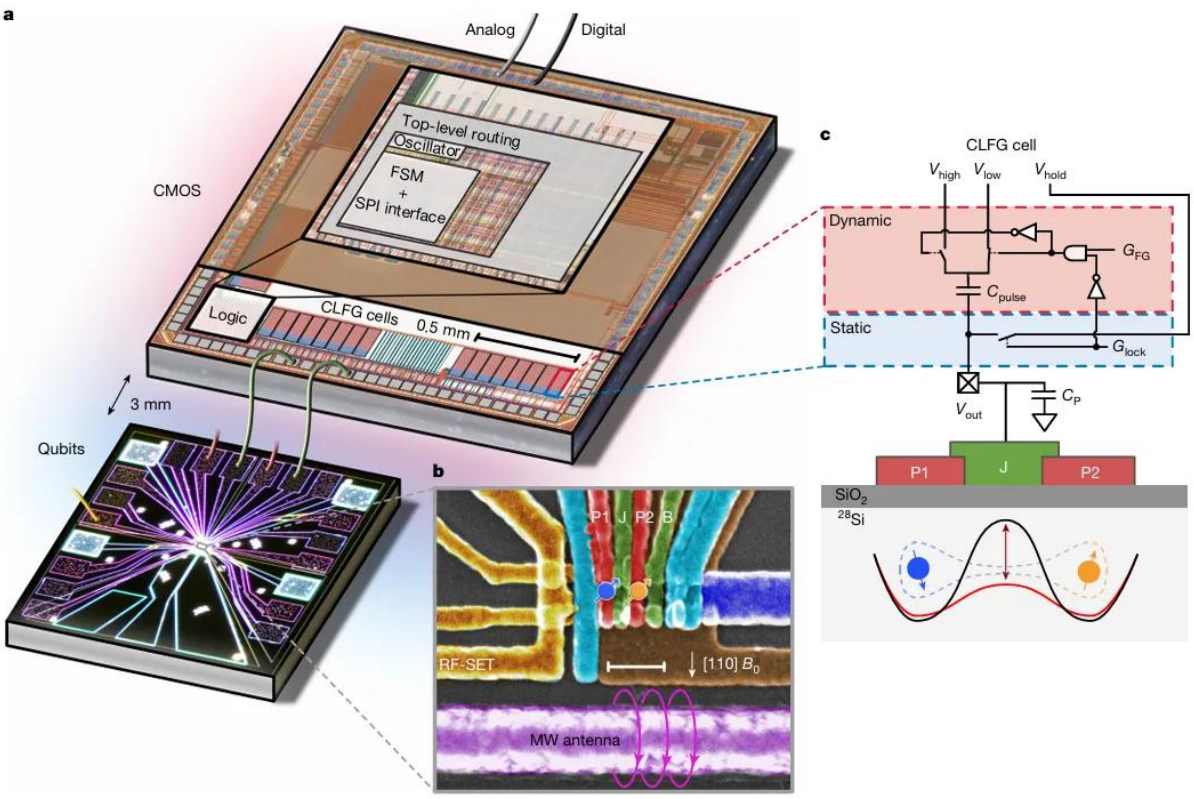


来源：https://www.nature.com/articles/s41586-025-09157-x

这种创新方法直接解决了扩展自旋量子比特的关键障碍：将量子设备连接到其外部控制和读出硬件所需的极高连接密度。研究团队所提出并演示的解决方案包括将控制系统紧密地放置在毫开尔文温度下的量子比特平台附近，并通过微型互连线连接。所开发的cryo-CMOS电路在运行中展现出足够低的功耗密度，从而能够实现大规模集成和扩展。

该研究的一个重要发现是，毫开尔文控制系统对单量子比特和双量子比特门的性能影响“微乎其微”。实验所观察到的轻微保真度下降主要归因于主要归因于CMOS产生的寄生热而非电噪声，这与此前依赖室温控制系统的实验相比，是一个令人惊喜的积极结果。该集成的亚开尔文CMOS平台结构复杂，包含了约10万个晶体管，展示了控制集成的高级水平。

图表 器件与基本CMOS操作



来源：https://www.nature.com/articles/s41586-025-09157-x

这些结果有力地证实了异质毫开尔文CMOS技术在生成控制自旋量子比特所需精确伏特级偏置和毫伏级脉冲方面的可行性。这种紧密封装的“小芯片式”控制架构为自旋量子比特的可扩展控制开辟了广阔前景，有效利用了其固有的亚微米尺寸。利用行业标准CMOS平台制造工艺 是实现硅自旋量子比特系统大规模生产和广泛可扩展性的关键因素。

成功在低温下集成CMOS，代表了自旋量子比特可扩展性方面的一项重大突破。这项技术有效地克服了输入/输出（I/O）瓶颈，利用成熟的经典微电子技术为硅基量子计算机的大规模扩展提供了一条具有前景的实用途径。

05 无线太赫兹低温互连技术

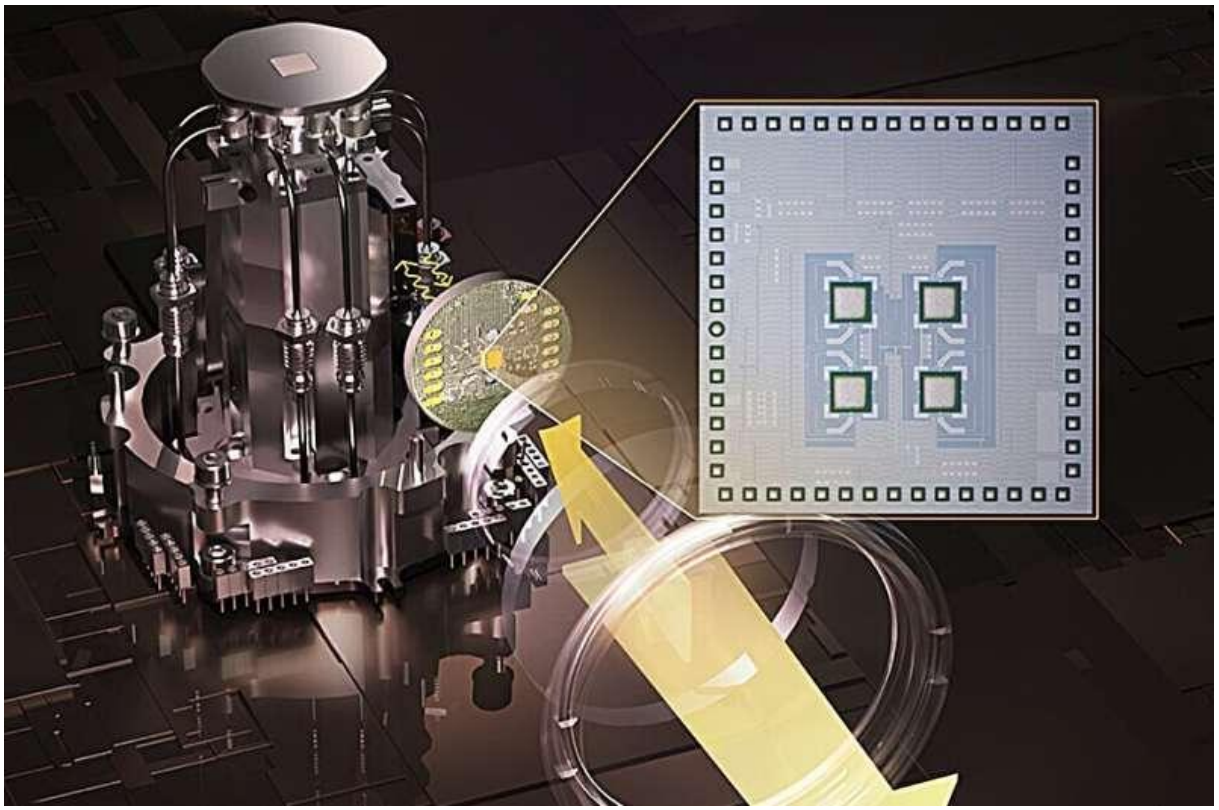
2025年5月，麻省理工学院和康奈尔大学的Jinchen Wang及其同事在《自然·电子学》上发表了一项研究，介绍了用于量子计算的无线太赫兹低温互连技术。

这项创新技术基于互补金属氧化物半导体（CMOS）技术，专门设计用于最大限度地降低量子计算系统中的热量-信息传输比。该架构集成了工作在260 GHz载波频率的宽带收发器。它具有一个“热到冷入口”通路，利用无源冷场效应晶体管（FET）太赫兹探测器；以及一个“冷到热出口”通路，在冷端使用超低功耗反向散射调制。该系统设计支持二进制相移键控（BPSK）和开关键控（OOK）调制，以实现高效数据传输。

这项研究主要解决了传统同轴电缆引入的显著传导热负荷（例如，稀释制冷机中4K级约1mW，50K级数十mW）以及光学互连（在低温下每个被吸收的光子都可能导致大量发热和准粒子激发）所带来的挑战。无线太赫兹方法从根本上最大限度地减少了这种热量-信息传输，为高效连接低温量子比特和室温控制器之间的巨大温差提供了一个关键解决方案。该设计采用40纳米CMOS技术实现，在4.2K温度下，奈奎斯特输入信噪比（SNDR）高达36.2dB，这表明其在极端低温条件下仍能保持高数据完整性。

这项技术对于开发实用型、大规模量子计算机至关重要，未来的量子计算机将需要数千个逻辑量子比特，这可能意味着数百万个物理量子比特和前所未有的互连密度。它有望提供高容量、可重构的多通道低温互连，其运行接近信息传输的基本物理极限。通过有效克服传统电缆物理布线和热负荷带来的可扩展性限制，这项技术为量子处理器的物理扩展提供了直接的解决方案。

图表 经典硬件与量子硬件之间的信息传输，包括现有互连方式的热负荷示意图。



来源：https://www.nature.com/articles/s41928-025-01355-9

这项技术直接解决了热负荷和互连密度这一关键挑战，通过提供高效、低热量的数据传输，为量子处理器的物理扩展开辟了新的可能性。

06 可互换超导量子比特器件的初级网络

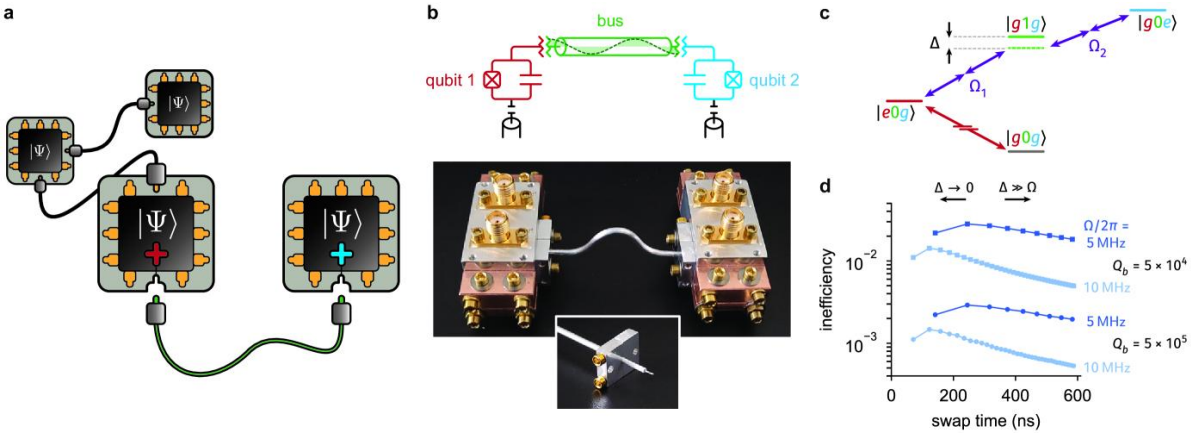
2025年7月，伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校的Wolfgang Pfaff及其同事报告了可互换超导量子比特器件初级网络的进展，这项研究聚焦于量子处理器的模块化扩展架构开发。研究人员强调，单片制造的超导量子比特器件在系统尺寸和质量方面都存在限制，因此模块化方法具有重要价值。该论文详细描述了高效互连的技术，这是一种连接两个超导量子比特器件的低损耗可拆卸电缆。他们通过“快速泵浦方案”解决了这种连接中的残余损耗。

这项技术突破的核心在于开发了一种基于低损耗可拆卸同轴电缆连接的高效互连方案，以往的方法往往由于难以兼顾低损耗和可互换性而在网络能力或性能上有所妥协。研究人员通过实施快速泵浦方案，成功克服了可拆卸连接中的残余损耗，该方案使得模块间SWAP操作效率在100纳秒内达到99%的水平。

所开发的方案实现了高保真度的模块间纠缠生成，并可操作分布式逻辑双轨量子比特。这项工作中的设备间操作错误率约为1%，已达到容错阈值。这是一项重要成就，因为此前的实验损耗超过15%，远高于规模化所需的要求。实验实现了基本的“即插即用”量子网络，其中带有定制连接器的超导同轴电缆与透射量子比特电容耦合，充当模块化、高Q值的量子总线。

Pfaff等人的工作通过提出和演示模块化架构，为量子计算的可扩展性做出了实质性贡献。这种模块化架构允许可重构和可扩展的网络，对于扩展量子处理器尤为关键。这意味着系统可以通过插入预先测试好的、更高保真度的量子比特模块进行升级，计算能力也可以通过插入额外的模块进行扩展。该研究直接解决了单片制造超导量子比特器件在系统尺寸和质量方面的限制，通过实现“乐高式”组装、重新配置和扩展，这种模块化方法为大规模量子处理器提供了一条途径。开发同时允许可互换性和高保真度操作的接口是关键一步，这使得组件能够无缝添加和移除，这在经典计算机中是常规操作，但在量子系统中一直是一个重大挑战。实现99%的模块间SWAP效率和约1%的错误率，意味着设备间操作已达到容错阈值，这一性能与超导量子比特电路和电缆之间的超导键合所展示的性能相媲美，展示了通往可扩展、纠错量子系统的可行路径。

图表 实验概述，说明了将量子设备扩展为模块网络如何允许子系统的重新配置或更换，强调了通过可拆卸链路在不同模块中的量子比特之间高保真传输量子态的能力。



来源：https://www.nature.com/articles/s41928-025-01404-3

超导量子比特的模块化与高保真互连技术的结合，为实现容错量子计算提供了一条可行的工程路径，因为它能够构建可扩展、可重构和可升级的量子系统。

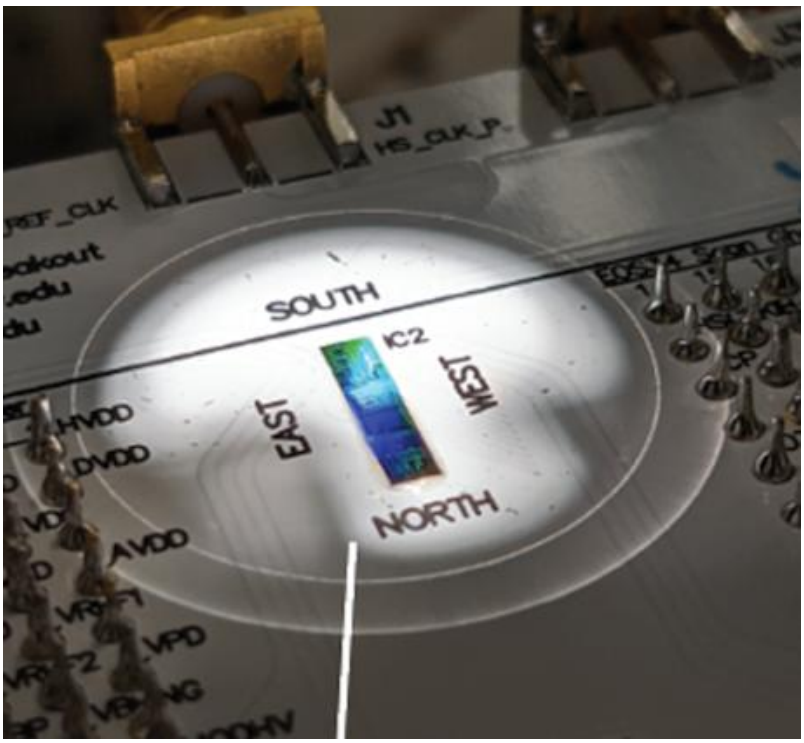
07 电子-光子量子片上系统

2025年7月，加州大学伯克利分校、波士顿大学和西北大学的Danielius Kramnik及其同事报告了世界首个电子-光子量子片上系统。

研究的重点是将量子光源和稳定电子元件集成到单个硅芯片上。该系统能够产生可靠的关联光子对流，芯片包含一个“量子光源工厂”阵列，每个工厂尺寸小于一毫米见方，旨在生成量子态光。这些工厂利用精确设计的微环谐振器等光子器件，对于生成关联光子流很重要。

这项突破性工作实现了世界首个电子-光子-量子片上系统，利用标准的45纳米半导体制造工艺将量子光源和控制电子元件集成到一块硅片上。团队构建了一个集成系统，能够主动稳定片上硅微环谐振器。这些谐振器对温度和制造偏差极其敏感，可能会干扰光子对的生成。

图表 实验中放置在探针台显微镜下包含芯片的封装电路板



来源：https://www.bu.edu/eng/2025/07/14/first-electronic-photonic-quantum-chip-created-in-commercial-foundry/

该系统将控制直接嵌入芯片内部，实现了量子过程的实时稳定。这是通过在谐振器内部集成光电二极管来实现的，这些二极管在保持量子光生成的同时监测与入射激光的对准。片上加热器和控制逻辑持续调整谐振，以抵消漂移。该芯片是在商用45纳米互补金属氧化物半导体（CMOS）芯片平台上制造的，该平台最初由波士顿大学、加州大学伯克利分校、格芯和Ayar Labs紧密合作开发。这表明该制造工艺现在能够支持复杂的量子光子系统。该项目需要跨不同领域的紧密协调，从而在商用CMOS平台的严格限制下，将电子学和量子光学作为统一系统进行协同设计。

这项进展为大规模可生产的“量子光源工厂”芯片以及由多个此类芯片协同工作构建的大规模量子系统铺平了道路。通过展示在商用半导体代工厂构建可重复、可控量子系统的能力，该研究解决了将量子系统从实验室环境推向可扩展平台的一个关键挑战。每个光源内置的稳定反馈机制确保了尽管环境变化，系统仍能保持可预测的行为，这是扩展量子系统的重要要求。随着量子光子系统规模和复杂性的增长，此类芯片有望成为未来量子计算基础设施、安全通信网络和先进传感技术的基础构建模块。

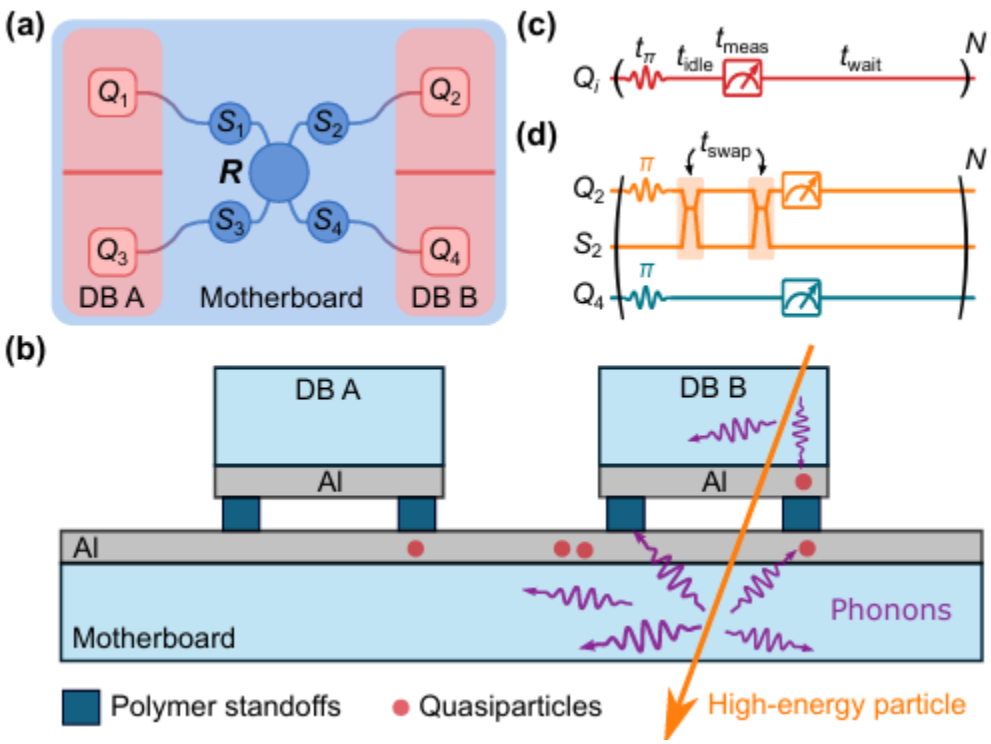
这项突破验证了利用成熟的经典半导体制造工艺大规模生产复杂量子光子系统的可行性，为可扩展的集成量子技术奠定了基础。

08 超导量子计算机的扩展挑战

2025年7月，来自谷歌量子人工智能（Google Quantum AI）的Anthony Megrant和Yu Chen在《自然·电子学》的一篇评论文章中讨论了扩展超导量子计算机所面临的挑战。他们指出，构建一台有用的量子计算机可能需要数百万个超导量子比特。

超导量子比特系统在规模化扩展过程中，已观测到具有灾难性的芯片级关联误差现象。已有研究表明，这类误差主要源于宇宙射线等高能粒子的撞击事件，其物理机制表现为：当高能粒子与芯片材料相互作用时，会激发太赫兹频段的声子，这些声子与超导金属作用后产生大量准粒子（QPs）。准粒子浓度的骤增会显著抑制量子比特的能量弛豫时间（T1），导致量子态存储失效。此类关联误差对表面码等传统量子纠错方案构成严峻挑战，因其具有跨量子比特的关联特性，远超现有纠错码的设计容错阈值。该论文提出，模块化量子计算架构可有效缓解关联性能量衰减事件。实验数据显示，单个模块内部衰减事件的关联性高达85%以上，而物理隔离的独立模块间关联性仅约2%。这一发现表明，通过模块化设计与定制化纠错编码的协同优化，有望构建抗芯片级关联误差的新型量子处理器。

图表 模块化量子处理器的布局和测量脉冲序列



来源：https://arxiv.org/pdf/2505.15919

当前针对衰减事件的抑制策略主要包含五类技术路径：增强辐射屏蔽、多能隙超导器件设计、衬底背面声子吸收层、常规金属准粒子陷阱、噪声环境调控。尽管其中的部分方法已降低了灾难性衰减事件的发生率，但量子态退相干过程中的关联误差仍未完全消除。

如Megrant与Chen所述，构建容错量子计算机的工程挑战“堪比建造欧洲核子研究中心（CERN）或激光干涉引力波天文台（LIGO）等大型科学设施”，必须通过产学研协同创新机制持续推进。

超导量子计算机在扩展过程中面临的核心挑战——特别是宇宙射线诱发的关联误差问题，凸显出两个关键发展方向：首先，必须发展模块化架构等创新性系统解决方案；其次，需要建立类似CERN或LIGO等大科学工程的组织模式，推动跨学科、大规模协同攻关。这也揭示了量子计算发展的本质特征：它不仅是量子物理与计算机科学的交叉，更需要材料工程、高能物理、低温技术等多学科的深度融合与协同创新。

IV. 结论

从PsiQuantum在光子量子计算平台上的可制造性突破，到微软在拓扑量子比特方面的探索，再到D-Wave在量子退火加速神经网络训练方面的性能优势，以及硅基量子比特控制中低温CMOS集成的成功，这些成就共同描绘了一幅充满活力的创新图景。此外，无线太赫兹低温互连技术和可互换超导量子比特器件的模块化网络等关键基础设施的发展，直接解决了大规模量子系统面临的互连和热管理挑战。同时，电子-光子片上系统的出现，进一步验证了利用成熟半导体制造工艺实现量子技术大规模生产的可行性。

尽管这些进展令人鼓舞，但贯穿所有量子计算模式的核心挑战仍然是可扩展性。无论是需要数百万量子比特的超导系统，还是需要克服连接密度和环境噪声的自旋和光子系统，将实验室演示转化为实用级量子计算机都需要巨大的工程投入。超导量子计算机面临的类宇宙射线事件等挑战，进一步凸显了对创新架构和鲁棒纠错方案的需求。

当前量子计算领域的发展趋势表明，克服可扩展性障碍正日益依赖于对经典半导体制造能力和模块化架构的战略性利用。例如，光子和硅自旋量子比特领域都明确地将可制造性和与现有CMOS工艺的兼容性作为实现大规模化的关键路径。超导量子比特的模块化设计也旨在通过“乐高式”组装来解决规模化问题。

最终，构建容错量子计算机被比作建造CERN或LIGO等大型科学设施，这强调了其固有的复杂性和所需的资源规模。因此，产业界和学术界之间持续、深入的合作，将是推动量子计算从当前阶段迈向全面实用化的不可或缺的要素。这种跨学科、跨机构的协同努力，是实现未来量子技术潜力的关键所在。

参考链接

https://www.psiquantum.com/news-import/omega

https://news.microsoft.com/source/features/ai/microsofts-majorana-1-chip-carves-new-path-for-quantum-computing/

https://www.nature.com/articles/s41586-024-08445-2

https://arxiv.org/abs/2502.12252

https://www.science.org/doi/10.1126/science.ado6285

https://www.dwavequantum.com/company/newsroom/press-release/beyond-classical-d-wave-first-to-demonstrate-quantum-supremacy-on-useful-real-world-problem/

https://www.nature.com/articles/s41586-025-09157-x

https://diraq.com/newsdesk/quantum-partnership-yields-scalable-control-for-future-computers

https://www.nature.com/articles/s41928-025-01440-z

https://thequantuminsider.com/2025/02/26/psiquantum-announces-omega-a-manufacturable-photonic-quantum-computing-chipset/

https://en.wikipedia.org/wiki/Majorana_1

https://arxiv.org/pdf/2506.05244

https://www.nature.com/articles/s41928-025-01355-9

https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12240860/

https://www.nature.com/articles/s41928-025-01404-3

https://www.bu.edu/eng/2025/07/14/first-electronic-photonic-quantum-chip-created-in-commercial-foundry/

https://www.psiquantum.com/

https://epic-photonics.com/wp-content/uploads/2021/12/Kishor-Desai-PsiQuantum.pdf

https://azure.microsoft.com/en-us/blog/quantum/2025/02/19/microsoft-unveils-majorana-1-the-worlds-first-quantum-processor-powered-by-topological-qubits/

https://news.microsoft.com/source/features/innovation/microsofts-majorana-1-chip-carves-new-path-for-quantum-computing/

https://www.researchgate.net/publication/392467005_How_to_Train_Your_Dragon_Quantum_Neural_Networks

https://thequantuminsider.com/2025/03/13/d-wave-deep-dive-a-look-at-the-quantum-advantage-findings-and-the-questions-that-remain/

https://www.researchgate.net/figure/Visualization-of-a-typical-quantum-algorithm-workflow-on-a-D-Wave-quantum-annealer_fig1_362918140

https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5123048/

https://www.researchgate.net/publication/393094443_A_high-efficiency_elementary_network_of_interchangeable_superconducting_qubit_devices

https://news.northwestern.edu/stories/2025/07/first-electronic-photonic-quantum-chip-manufactured-in-commercial-foundry/

https://arxiv.org/pdf/2505.15919

光子盒研究院
QUANTUMCHINA

光子盒研究院是一家专注于前沿科技与未来产业发展的创新型研究机构，以"探索科技边界、赋能产业升级"为使命，致力于成为全球科技创新生态系统中不可或缺的智库力量。研究院以前沿技术演进为观察坐标，以量子科技为核心研究领域，深度布局人工智能、先进计算、未来材料等战略方向，构建起"技术前瞻-产业应用-政策研究"三位一体的研究体系。

【核心定位与研究领域】

作为量子科技领域的专业研究平台，研究院聚焦量子计算、量子通信、量子传感三大技术主航道，持续跟踪全球量子科技关键技术突破。通过建立覆盖"基础研究-技术转化-产业应用"的全链条分析框架，研究院定期发布量子计算硬件发展路线图、量子安全通信应用白皮书等权威报告，为行业提供具有前瞻性的技术评估与产业化路径建议。

【智库服务与价值创造】

研究院构建了独特的"产学研政资"协同创新网络，为政府部门提供科技创新政策制定咨询，协助构建量子科技产业园区规划；为科研机构搭建技术转化评估模型，推动实验室成果与产业需求对接；为企业客户定制技术路线选择、市场竞争策略及专利布局方案；为投资机构建立科技项目价值评估体系，甄别具有突破潜力的早期技术项目。目前已形成季度产业研究报告、年度技术趋势预测、专项政策建议书等系列知识产品。

【研究特色与竞争优势】

依托跨学科研究团队（涵盖物理学、计算机科学、产业经济学等领域专家），研究院创新性采用"技术成熟度曲线+产业生态图谱"双维分析法，结合专利大数据挖掘与全球科研动态监测，确保研究成果的客观性与时效性。通过建立量子科技企业数据库（覆盖全球600+相关机构）、搭建院士专家委员会、主办国际量子产业峰会等举措，持续强化在量子科技领域的资源整合能力与行业影响力。

光子盒研究院始终秉持"以科技洞见未来"的核心理念，通过深度行业洞察、精准趋势研判和务实解决方案，助力客户把握量子革命带来的战略机遇。在科技创新加速重构全球产业格局的当下，研究院将持续输出具有决策价值的智库成果，推动前沿科技与实体经济的深度融合，为人类科技文明进步贡献智慧力量。

光子盒研究院
QUANTUMCHINA

北京市海淀区上地三街中黎科技园1号楼618室

扫码关注光子盒

扫码添加盒叔