

哪把“钥匙”能打开未来“大门”

——“解读量子计算新进展”系列报道之二

◎本报记者 胡定坤

量子计算作为下一代信息处理技术的重要方向，正受到各国高度重视。量子芯片是量子计算机的数据处理器，是实现量子计算的核心。近年来，基于不同物理原理的量子芯片不断涌现。

2024年12月上旬，谷歌（Google）公司推出其最新量子芯片“威洛”（Willow），引发全球舆论的高度关注。这或许代表了通往量子计算的某条路径有所突破，但最终哪把“钥匙”能真正打开量子计算的“大门”仍未可知。

技术路径“百花齐放”

“芯片化、集成化是量子计算机由实验装置走向实用的必然趋势。”上海交通大学教授、图灵量子创始人金贤敏介绍，量子芯片可按照其所用量子比特的类型分类，目前主要有三大主流技术路径——超导、光量子和离子阱。近年来，中性原子量子比特技术有所发展，可能成为第四大路径。

美国国际商用机器公司（IBM）、Google等企业将超导量子芯片作为主要攻关方向。2019年1月，IBM发布全球首台完全集成的通用量子计算机——“IBM Q System One”，其芯片包含20个超导量子比特。同年，Google借助包含53个超导量子比特的“悬铃木”（Sycamore）量子芯片，率先演示量子霸权。最近大火的Willow也是超导量子芯片。

2021年，加拿大量子计算企业Xanadu推出8个比特的X8光量子芯片，拉开了光量子计算商业化的序幕。2022年6月，Xanadu使用可编程光量子芯片Borealis，展示了量子计算优越性。

2015年，专注于研制离子阱量子计算机的IonQ公司创立。2020年，IonQ发布了一个包含11个量子比特的量子芯片，宣称其实现了比Google更高的量子优越性。IonQ之后又相继发布包含20个量子比特、32个量子比特的芯片。在IonQ之后，美国霍尼韦尔子公司Quantinuum等也加入了研制离子阱量子芯片的行列。

近几年，中性原子技术路径也开始崛起。美国、法国等国研究团队相继在这一领域取得进展。

“此外，硅基量子比特、拓扑量子比特等技术也在发展之中，但与超导、光量子等主流路径相比，仍处于非常早期的阶段。”金贤敏说。

科大国盾量子技术股份有限公司量

子计算云平台负责人储文皓说，即便是同一类技术路径，不同团队选择的实现方式也不尽相同。例如，同样是超导量子芯片，Google将量子比特排列成四边形，而IBM量子比特的布局则是呈蜂窝状的六边形。

关键难题亟待破解

“成也萧何，败也萧何。”金贤敏说，不同类型的量子比特催生了不同的量子芯片技术路径，但也给这些技术路径带来了与生俱来的固有问题。

储文皓说，可以使用量子比特数、保真度（计算的错误率）、系统相干时间（量子比特保持量子状态的时间，量子计算只能在量子状态下开展）等指标来评价一种量子芯片。

储文皓介绍，超导量子芯片使用“约瑟夫森结”为基础的超导电路充当量子比特，其最大优势是可利用现有成熟的集成电路工艺进行制造，可扩展性强，容易构建比特数更多的量子芯片。

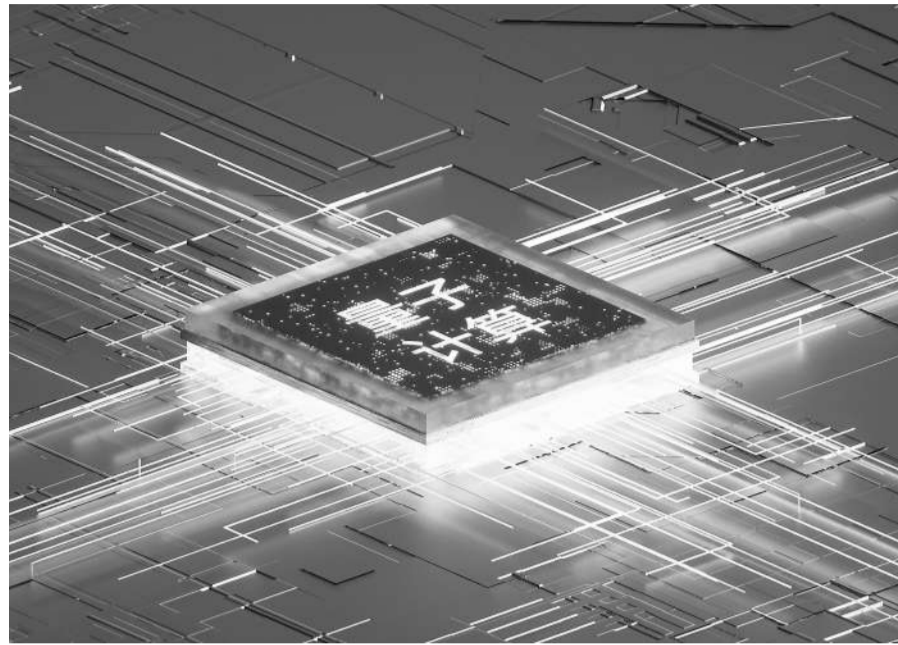
“但超导量子比特易受环境影响，相互之间也容易产生干扰，导致计算错误率较高，所以超导量子芯片尤其需要解决纠错问题。”金贤敏说，此外，超导电路需要在接近绝对零度的极低温度下运行，这必然会增加量子计算机的制造成本和使用时限制条件。

“光量子芯片利用光子作为量子比特。”金贤敏解释，光子不受电磁噪声干扰，量子相干时间极长，适用于长时间量子计算。同时，光量子芯片可在常温下运行，无需超低温制冷设备，显著降低了运行成本和部署难度。更重要的是，光量子芯片对制造工艺要求较低，可利用现有半导体技术逐步进行迭代优化。

“但光量子芯片也面临光子间相互作用难以工程化、集成光子线路设计难度大等挑战。”金贤敏说，相比超导量子芯片，其初期技术门槛更高，发展路径较为陡峭。

“离子阱量子比特是把一个带电粒子放到电磁场中，利用激光来调控。”储文皓介绍，离子阱技术路径的最大优势是相干时间长，达到了小时级，计算保真度也非常高。但问题是扩展性相对较差，目前离子阱芯片实现的量子比特数较少，原因是离子间的相互排斥容易导致离子阵列的混乱。

中性原子量子计算使用激光冷却和囚禁中性原子，通过微波或光学跃迁操控原子作为量子比特。“中性原子最大的优势是扩展性超强，目前所有固态类型的量子处理器中，中性原子技术实现的量子比



量子计算概念图。视觉中国供图

特数是最多的。”储文皓说，但中性原子的高效读取非常困难，且现有的中性原子量子比特更像一个实验室样品，距离工业化还很远。

“离子阱和中性原子技术路径有个相似的问题。”金贤敏说，这两种技术路径在构建量子比特时，都需要激光器或宏观光学元器件，技术较为复杂，加大了芯片集成的难度。

花落谁家尚未可知

2023年，美国工业咨询公司ADL发文称，其邀请数百名业内人士参与调查，结果分别有39%、35%和36%的量子专家认为基于电子（如超导）、基于原子（包括中性原子和离子阱）和基于光子的量子比特技术会最先取得成功。文章认为，这种均衡的分布表明，哪种量子比特能够打开量子计算的“大门”这一问题仍然悬而未决。

放眼全球，很多国家都采取了多路攻坚、多头下注的方式，同时发展多种量子芯片技术。以美国为例，2022年，超导量子计算企业Rigetti Computing获美国国防高级研究计划局（DARPA）资助。2023年初，DARPA宣布选定Atom Computing、微软和PsiQuantum公司分别研究中性原子、拓扑和光量子计算机的设计概念。2023年12月，DARPA资助的哈佛大学等机构研究人员在《自然》发表论文，称其开发出一种包括48个逻辑量子比特的中性原子量子芯片模型。

在金贤敏看来，尽管Willow在解决

超导量子芯片纠错问题上取得了科学原理上的突破，但目前要研制出百万量子比特的通用量子计算机尚需时日，最先胜出的技术路径可能是超导或者光量子。

金贤敏认为，现有技术路径中只有这两种已经实现了量子霸权。值得注意的是，光量子芯片在玻色采样实验实现了量子霸权，相比超导量子芯片实现量子霸权的随机线路采样实验更具有潜在应用价值。采用光量子路径可能先于超导路径研制出某些领域的专用量子计算机。“美国PsiQuantum公司是目前全球融资最多的量子计算初创企业，它采取的正是光量子芯片技术路径。这可能代表了资本市场的某种选择。”金贤敏说。

储文皓则认为，光量子路径在专用量子计算机上确有优势，但Willow在纠错问题上的突破无疑给超导路径打了一剂“强心针”。超导路径能否实现商业化应用的量子计算机已不是一个科研问题，而是一个工程问题。如果更高性能的制冷机、集成度更高的超导芯片、使用人工智能高精度控制量子比特等技术能够得到解决，Google和IBM提出的在2030年左右研制出百万量子比特的商业化量子计算机的目标是很有可能实现的。光量子路径还需要解决一些科研问题，特别是光学元器件的集成化、微型化等问题。如果集成光子学能够取得突破，光量子路径可能与超导路径并驾齐驱。

“针对光量子的这些问题，我们正在提出一些解决方案，通过引入非线性光学材料、模块化设计等手段，逐步解决瓶颈，推动光量子芯片在扩展性和商用化方面取得突破。”金贤敏说。

精准制造：从微纳米迈向原子尺度

◎本报记者 张佳星

“空天海地的网络建设，信息世界感知力、通信力以及算力的建设，迫切需要高端、新型的硅基芯片。然而‘自上而下’的光刻技术制造方式已经接近物理极限。”在日前举行的香山科学会议上，中国科学院院士许宁生说，全球精准制造的竞争已从微纳米尺度迈向原子尺度，未来硅基芯片的发展水平将取决于大规模原子制造技术水平。

此次香山科学会议聚焦原子制造前沿科学问题。1纳米技术节点被视为硅基芯片制造加工技术的物理极限。晶体中相邻原子的距离大约几个埃（0.1纳米），如果能通过直接操控原子来制造芯片，将颠覆以现有光刻技术为基础的制造规则。

从石器时代走来，人类的制造技艺不断进步，正在走进能精准操控物质最基本单元——原子的时代。与会专家认为，在这个过程中，人类不仅将突破诸多制造极限，也将刷新对基础理论的认识。

有望突破芯片制造极限

当前的芯片制造采用“自上而下”的制造方式。这指的是一种从整块材料开始，通过逐层添加、移除或改变材料性质来构建复杂结构的方法，包括薄膜沉积、光刻胶涂敷、光刻显影、刻蚀、量测、清洗、离子注入等多个环节。

为了在单位面积内实现更多晶体管的布局，2011年，研究人员采用鳍式场效应晶体管技术，改变集成电路结构，突破芯片22纳米制程工艺。进入5纳米技术节点后，电子隧穿问题又催生了环绕式

结构、垂直传输场效应晶体管等新的结构设计。

然而，随着加工精度不断提升，宏观方式的制造极限随之而来，仅通过结构的巧妙设计将难以满足人们对芯片计算能力日益增长的需求。尤其是随着生成式人工智能的发展，及其在各行各业的垂直落地，算力不足、计算成本过高等问题逐渐凸显。

“硅基芯片大规模原子制造技术的发展可能带来计算和智能技术的基础性变革。”许宁生认为，应在关键材料研制、微纳结构集成、核心加工制造检测等领域开展关键技术研究，推动实现硅基芯片的原子制造。

那么，什么样的材料适用于芯片等元件的原子制造？复旦大学物理学系教授张远波介绍，国际上认为二维半导体是1纳米及以下节点的重要材料体系，也是唯一公认能够延续摩尔定律的材料。

二维材料具有独特的单分子层晶体结构，例如石墨烯是由碳原子组成的二维材料。“二维材料及器件有高载流子迁移率、丰富电学性能等特点，在1纳米的条件下仍能正常工作，有望突破传统半导体器件的极限。”张远波介绍，近年来，在二维材料的缺陷调控、应力调控、电荷调控、转角堆叠调控等方面，学界取得了巨大进步。例如，晶圆级的二维材料生长已经实现，基于二维半导体集成电路工艺也已经能够实现大部分硅基电路功能。

关键在于精准可控组装

尽管不少二维材料实现了较大规模的实验室生产，但二维材料仍难以

根据需求“随心”构筑。与会专家认为，操纵二维材料和结构，进而构筑异质结构和器件，实现其性质与功能的人工设计与调控，仍是原子制造的核心科学问题。

“通过学习自然，开发先进制造技术，可以实现原子团簇或分子的精准可控组装与制造。”中国科学院院士刘云圻认为，信息技术微型化发展要求原子制造领域在结构、序列、取向、堆叠方式等方面简单、无序、经验型向复杂、有序、智能型方向发展。

“更为神奇的是，在微观层面，如果将原子或分子按照我们想要的方式排列，就能获得千变万化的性能。”刘云圻说，这些性能是宏观制造难以获得的。需要深入认识微观分子的反应和组装规律，掌握材料的基本物理性质，进而构筑新型柔性微纳器件，以满足未来对人造智慧体制备的需要。

此外，二维材料制造时的实时在线检测，对其生长的严格控制也十分关键。国家纳米科学中心研究员谢黎明介绍，为了揭示相关二维材料的生长机制，团队研发了高温原位光学成像技术，可在化学气相沉积系统内植入高温显微成像镜头，实现950℃下1微米空间分辨率的二维材料生长实时成像，从而揭示二维材料的生长动力学与生长机制，获得其生长速率、扩散速率等关键参数。

工欲善其事，必先利其器。基于高分辨率的在线观测，以及离线的扫描透射电子显微镜成像数据，团队发展出液相边缘外延生长方法和设备，实现了二硫化钼的全单层生长。

中国科学院物理研究所研究员张广宇团队则基于高质量二维二硫化钼晶圆生长的基础，通过界面缓冲层控制

的新策略，在工业兼容的C面蓝宝石衬底上成功外延生长出2英寸的单层二硫化钼单晶薄膜。相较于硅，二硫化钼具有更强的电子控制能力，被认为是制造下一代芯片的理想材料。

瞄准功能“定制”目标

如何使用大规模集成二维材料制备的晶体管，制备运算速度更快、更省电的芯片？这样的芯片究竟长什么样？

张广宇说，从操控原子出发形成最终产品，使其具备结构上的原子精准和功能上的“定制”，是继微纳制造之后的下一代制造技术。当前，原子尺度的相关产品处于萌芽阶段，更多技术路线正在不断研发中。

“后摩尔时代的计算机芯片需要在工艺和架构方面突破经典架构，其中兼容半导体工艺的固态量子计算芯片是一种有竞争力的技术路线。”西安交通大学材料学院自旋电子材料与量子器件研究中心教授潘毅介绍，由高度相干的全量子点构成的量子比特是构成固态量子芯片的基本单元。

为了制造全同的人工量子点，潘毅团队与德国PDI研究所合作，利用扫描隧道显微镜进行原子操纵，在砷化镓表面构筑了多个全同性良好的人工量子点。这种方法有望成为未来固态量子计算所需的大规模耦合量子点阵列的重要制造方式。

与会专家表示，以定向自组装诱导图形化工艺技术、冷阴极并行电子束直写刻蚀制备技术、大规模扫描探针制备技术、X光光刻制备技术等为代表的加工技术也在不断完善和发展，为工业级别的大规模原子制造提供支撑。

新知

研究人员获取首份月背古磁场信息

科技日报讯（记者陆成宽）31亿年前，月球磁场强度曾急剧下降，之后一直很弱？对这个问题，我国科学家给出了不一样的答案。基于嫦娥六号月背样品，中国科学院的科研人员发现，月球磁场强度在28亿年前发生了反弹。这不仅是人类得到的首份月背古磁场信息，还为认识月球磁场演化过程提供了新认识。相关论文日前在线发表于《自然》。

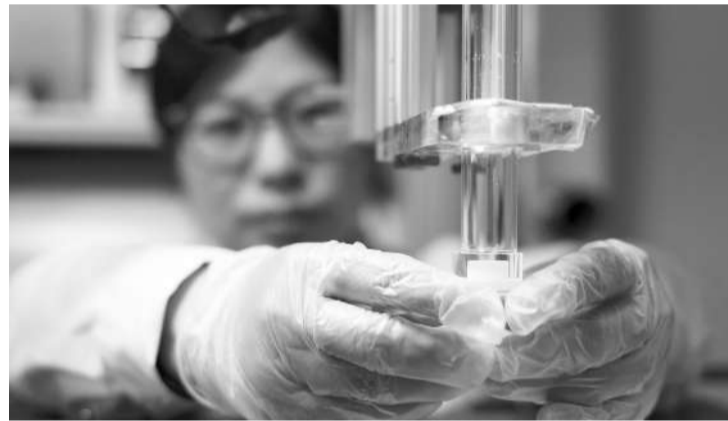
地球液态外核导电流体的运动如同一个“发电机”，其产生的磁场像保护伞一样包裹着地球，屏蔽宇宙射线，保护地球的大气和水等宜居要素，助力形成适合生命繁衍的环境。月球也曾有过与地球类似的磁场“发电机”。了解月球磁场“发电机”的演化过程，对揭示月球的内部结构、热历史以及表面环境具有重要意义。

卫星观测和月表实测结果均显示，现今月球已经没有全球偶极磁场。美国“阿波罗”月球样品研究表明，月球在42亿年至35亿年前存在一个相对活跃的“发电机”所产生的磁场，其强度接近现今地球磁场。该磁场在约31亿年前下降了一个数量级，之后一直处于很低的强度。其后，月球磁场强度在15亿年至10亿年前再次下降，并最终在距今10亿年以后的某个时刻完全消失。

“由于样品的局限性，此前发表的月球古磁场强度数据主要集中在30亿年前。科学界对距今30亿年以来的月球磁场中晚期演化过程的研究相对较少。同时，已有数据均来自月球正面返回样品，人们对月背古磁场的认识基本处于空白。”论文通讯作者、中国科学院地质与地球物理研究所副研究员蔡书慧说。

在这项研究中，科研人员对4颗毫米级玄武岩屑样品开展了磁学研究。结果显示，月球磁场可能在28亿年前发生了反弹。这表明，月球“发电机”的“发电机”在早期急剧下降后可能重新激活，原因可能是月球“发电机”主要能量来源发生变化或初始驱动机制再次增强。

《自然》审稿人认为，这是一项具有高度原创性的研究，填补了月球古磁场记录中长达十亿年的空白，并首次提供了来自月球背面的古磁场测量结果。



在中国科学院地质与地球物理研究所零磁空间实验室，副研究员蔡书慧摆弄嫦娥六号月背实验样品。新华社记者 金立旺摄

我国首次利用航空冰雷达开展冰川储量调查

科技日报讯（记者陆成宽）记者1月6日从中国科学院空天信息创新研究院（以下简称“空天院”）获悉，利用航空冰雷达与三维激光雷达、空天院科研人员在甘肃成功进行冰川透视探测，精确查明典型冰川储量。这是我国首次利用航空冰雷达开展典型冰川储量调查，相关成果为河西走廊各流域水资源管理、祁连山生态环境保护与区域可持续发展提供了关键数据支撑。

航空冰雷达是一种搭载在飞机上对冰川进行透视观测的雷达，通过对接收信息进行处理和反演后，得到冰川厚度及储量信息。

航空冰雷达是“透视地球”多圈层透视探测技术的重要组成部分，也是支撑构建“中国透视地球空基原型系统”的关键设备之一。与航空摄影相机、三维激光雷达、合成孔径雷达等传统对地观测成像技术相比，航空冰雷达技术能穿透冰川表面获取冰川内部信息和底部信息。

2024年9月至11月，本次调查共执行13次飞行任务，采集原始数据5.6太字节（TB），获得了冰川表面数字高程模型、冰川底部基岩数字高程模型、冰川剖面图、冰川储量、冰川三维视图及3个典型冰川储量等成果，完成了冰川厚度测量。

据悉，本次调查由2024年度甘肃省典型冰川航空冰雷达透视探测项目支持，新舟60遥感飞机、奖状遥感飞机执行飞行任务。验收专家组给予高度评价：项目首次实现了复杂地形条件下的复式山谷冰川冰厚测量，总体技术达到了国际领先水平。

高放废液玻璃固化配方通过验收

科技日报讯（记者付丽丽）中核集团中国核工程有限公司（以下简称“中核工程”）和武汉理工大学联合研发的陶瓷电熔炉高放废液玻璃固化配方，日前在我国首座国产化高放废液玻璃固化冷台架上完成试验验证，并通过验收。这标志着我国成功攻克了动力堆高放废液陶瓷电熔炉玻璃固化配方研制这一世界级难题，填补了国内空白，实现了陶瓷电熔炉玻璃固化技术国产化研究关键技术零的突破。

高放废物指的是高水平放射性废物，对其进行处理是确保核能安全利用、可持续发展的重要一环。当前，妥善处理高放废物的最佳选择是玻璃固化，即将高放废物与玻璃基体混合熔融，将放射性核素包裹在固化体中，实现高放废物与生物圈的隔离，从而有效消除高放废液长期贮存的安全风险。由于高放废液成分复杂，物理、化学性质各异，确定科学合理的玻璃固化配方，实现对高放废液的长期有效包容就成了攻克高放废液玻璃固化技术的重中之重。

该研究成果揭示了高放废液玻璃固化高温熔制过程的发泡机理，开发了基于玻璃“组成—性能”计算模型的高放废液玻璃固化配方设计方法，成功研制出具有高性能指标的动力堆高放废液玻璃固化配方。

中核工程相关负责人介绍，公司与武汉理工大学协同攻关，加快推进关键技术攻关和试验验证，成功将动力堆高放废液陶瓷电熔炉玻璃固化配方研制工作打造成产学研深度融合的标杆项目，为后续科研工作的完成及工程应用提供了坚强保障。