

1958年，杰克·基尔比发明了第一块集成电路，吹响了人类进入“硅时代”的号角。由于硅材料具有一定的半导体电学特性和物理稳定性，因此成为制作集成电路衬底支撑的关键性固态材料。目前，全球95%以上的集成电路制作在硅片上。硅最早由瑞典科学家琼斯·雅可比·贝采尼乌斯发现，他通过加热石英砂、碳和铁制得。该元素命名为silicon，源自拉丁文silex（燧石）。硅在地壳中含量高达26%，仅次于氧，居第二位。然而，自然界中硅不以单质形式存在，而是以硅酸盐、水晶、石英砂等化合物存在。美国硅谷的名字就是源于硅元素所推动形成的新兴产业。硅的结构特殊，一个硅原子周围有四个其他硅原子，形成立方金刚石结构，赋予其诸多独特性能和应用。硅可用于钢和铝合金的添加剂，锂离子电池的负极材料，以及光伏领域的太阳能电池基础材料。最重要的是，硅是集成电路的关键材料。

硅材料是集成电路的不二选择

集成电路是信息产业的基石，也是高科技的“明珠”，而硅是集成电路的基础材料。全球95%以上的半导体器件和90%以上的集成电路制作都是在硅片上完成的。所以说，没有硅就没有集成电路，没有集成电路就没有信息社会，所以硅是现代信息社会的基础和核心材料。硅之所以成为首选，原因有三个方面。一是其纯度极高，在所有的物质中，能够被提得最纯的就是硅材料，可达10个9以上，因此能控制材料里的电子输运性质；二是能够把原子排列成高度有序的单晶体结构，自然界中只有钻石才能做到这样，但硅晶体的体积可以很大，能达300毫米直径，这是其他材料所不具备的；三是原料丰富，地壳中含量高达26%，制备成本低廉，工艺成熟，能生长大直径、低缺陷的晶体，且可以做稳定的氧化层，安全无毒。这些优势使硅在过去70年里稳居集成电路基础材料的核心地位。

如何制备多晶硅

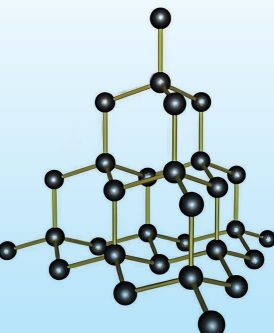
硅很重要，但是不是从鹅卵石或石英矿里面烧制出来的硅材料，就可以用于集成电路的制作呢？硅材料是一个典型的点石成金材料，由硅石（以二氧化硅为主要成分的矿物）经焦炭还原制得，也称工业硅，纯度约95%至99%，但无法直接用于集成电路。用于集成电路需进一步提纯至10个9以上的半导体级多晶硅，即每100亿个硅原子中仅含1个其他原子。根据中间化合物的反应，制备此高纯材料主要有两种工艺。一是三氯氢硅工艺（西门子工艺），最早由西门子公司发明，目前在全球占据主流。该工艺通过硅与盐酸反应生成三氯氢硅，经多次精馏提纯后，再还原出高纯硅。

硅为何成为集成电路的首选材料？

□ 杨德仁



杨德仁，中国科学院院士，浙江大学硅材料国家重点实验室主任，长期从事半导体硅材料研究，在硅材料的基础研究上取得重大成果，发明了微量掺锗硅晶体生长系列技术，系统解决了相关硅晶体的基础科学问题，研究了纳米硅的结构、性能，成功制备出纳米硅管等新型纳米半导体材料。



此过程需多次提纯，直至获得高纯中间化合物，最终还原得到高纯多晶硅。二是硅烷工艺，首先把硅做成硅烷，再在800摄氏度左右分解直接得到硅。该工艺较为简单且能耗低，但硅烷易燃易爆，气体处理复杂，全球产量仅占10%左右。

近年来，我国多晶硅产业发展迅速，特别是2005年后，受太阳能光伏产业推动，成为全球发展最快的国家。2023年，我国电子级多晶硅产量约6000吨，占全球15%；光伏级多晶硅产量143万吨，占全球89%。全球上规模的多晶硅企业中，中国有9家；国际高纯多晶硅企业中，中国有19家。此外，两家硅烷法制备多晶硅的企业均在中国。我国在光伏级高纯多晶硅产业上领先全球，电子级仍有待追赶。

制造单晶硅圆的工艺流程

制备出的多晶硅尽管纯度很高，但高纯度并不足以满足集成电路制造的所有要求，还需要将多晶硅提纯到足够纯净的单晶硅，这涉及一系列复杂的科学原理和高度精密的技术过程。比如，高纯多晶硅转化为晶体可以通过直拉法实现：将高纯多晶硅置于石英坩埚中加热至1420摄氏度熔化，随后用种子晶体接触熔体并向上提拉，熔体逐渐凝固成单晶硅。此即直拉单晶硅的生长过程。目前，直拉单晶硅直径大、体积大、工艺成熟，是纯度最高、结构最完整、产业规模最大的半导体晶体材料，也是人类研究性能和结构最透彻的人工晶体材料之一。

当我们获得硅晶体材料后，需进行加工，因为一个晶体棒无法直接使用。怎么加工？首先去除晶体的头部和尾部（晶锭的切断），接着将晶体滚圆以确保直径一致（滚圆），然后使用

金刚刀和线锯将其切成一个个薄片（切片）。由于切出来的硅片表面粗糙不平，需用磨磨机磨平并去除损伤层（磨片），最后进行抛光以提高表面整洁度和质量，降低粗糙度。抛光要求极高，相当于北京至杭州1100公里距离内的高低起伏不超过一厘米。整个过程中，还需在各道工序间严格清洗硅片或晶锭，最后得到一个超净的硅片。还有一种是在抛光硅片上面再加一层硅薄膜，这称为外延硅片。这样，所有集成电路均制备在这两种硅片上，即硅的抛光片或外延片上，这就是集成电路所用的硅材料。

那么，我国集成电路硅材料的产业处于什么样的状态？目前，6英寸及以下小直径硅片已实现完全国产化，8英寸硅片国内市场占有率约40%~50%，12英寸硅片约占15%~20%，且28纳米节点硅片已通过验证。在基础研究方面，浙江大学的科研人员在国际上提出了掺氮直拉硅单晶概念，利用氮原子调控抑制纳米级集成电路的微曲线问题，该方案已被全球工业界广泛采纳，应用于90纳米节点以下集成电路，成为中国的一个创新解决方案。

超越摩尔的选择——纳米硅和硅基光电子

我们经常听到的芯片7纳米、5纳米、3纳米，是指两个元器件之间的特征线宽，就是集成电路内部电路导线的宽度，它反映了集成电路的精细程度和集成度。集成度越高，所容纳的元件数目越多。随着集成电路的快速发展，特征线宽在不断降低，从过去的180纳米，到现在的10纳米、7纳米，7纳米芯片大约能容纳70亿个晶体管。世界集成电路的制程工艺水平已经由微米级、亚微米级、深亚微米级进入到纳米级阶段，这对包括光刻在内的半导体制程工艺提出了新的挑

战。随着芯片制程愈接近物理极限，有没有新的硅材料能满足纳米级集成电路的制备呢？

一个指甲大小的集成电路能集成10亿个元器件，目前技术已进展至7纳米、5纳米、3纳米，乃至挑战1纳米。但硅原子的原子间距约0.354nm，3个硅原子即达1纳米，接近物理极限，易引发量子隧穿效应。在这种情况下，集成电路怎么发展？一是延续摩尔（More Moore），即继续缩小特征线宽；二是超越摩尔（More than Moore），即多样化集成。这对硅材料提出新要求：一是越做越大，硅片直径需不断增大，目前已达300毫米（12英寸）；二是越做越小，需探索纳米级硅材料，如纳米硅颗粒、纳米线、纳米管、纳米带。纳米硅颗粒直径小于100纳米，特别当尺寸小于4.9纳米（硅的激子玻尔半径）时，会展现出量子限域、表面效应及多激子效应，性能大幅提升，可替代传统半导体材料。这种纳米硅能应用于发光、锂离子电池、生物技术及光伏等领域。通过调控纳米硅颗粒直径，可实现从蓝光到红光的全谱系发光，且支持电控制电子发光。

纳米硅线作为硅基光子光源，由哈佛大学的Lieber教授于1998年首次制备成功，现已广泛应用于集成电路。早期集成电路采用平面结构，现代则使用FinFET结构，其中硅部分被竖起。3纳米及以下器件中，硅呈现为线状，形成纳米硅线环栅或围栅结构，这一结构已成为主流。今后还会把纳米线变成纳米片，做成围栅结构。我国科学家在纳米硅领域的研究取得显著成就，如成功制备纳米硅颗粒、纳米硅线及纳米硅管，特别是做出了全世界首个纳米硅管，引导了国际上纳米硅管的制备。同时，在纳米硅围栅器件领域实现了突破，如北京大学团队在硅纳米线GAA弹道运输研究中，首次实验验证了弹道运输效率与自热效应，也首次提取了硅纳

米线围栅器件的涨落源，并通过优化设计大幅提升了器件的模拟与射频性能。

当硅片的特征线宽到了28纳米以后，虽然芯片的性能仍在提高，但是成本却不再降低，摩尔定律近乎失效。除此之外，当特征尺寸到了1纳米以后，将会遇到信号延迟、带宽受限和功耗密度的不断上升的问题。如何超越摩尔定律？

一种通过将光子引入到硅基集成电路上的技术脱颖而出，这就是硅基光子电子技术。硅基光子是超越摩尔定律的一个重要方向，它将微电子与光子结合。微电子以集成电路为基础，主要依赖电子的输运，而光子则在光与电之间进行转换，支撑了激光、互联网和光纤等高科技产业的发展。硅基光子在集成电路上实现了光的传输与控制，由于光在硅中的传输速度比电子快1000倍以上，因此其性能可以大幅提升。硅基光电子的优势包括带宽增加10倍以上、功耗降低10倍以上、无电磁干扰、重量和体积可能降低到1/10、接口密度增加等。它已成为数据中心、通信、自动驾驶、传感、高性能计算和人工智能等领域的重要应用场景，成为集成电路发展的重要方向。西方发达国家，如美国、日本、德国的大型企业早在20年前就布局硅基光子，进行了长期投入和研发。比如，美国成立了一个专门的12英寸、300毫米的硅基光子

子研究项目，大力推动硅基光子，这已经成为一个重要产业爆发的前夜。预计今年，硅基光电子的销售额将是2020年的4倍。

为什么要让硅基发光

硅基光子材料的制备，包括光源、波导、调制、探测、封装等不同阶段，其中最核心的就是硅基光源，也就是让硅基发光。因为硅材料是间接半导体材料，发光强度、发光效率极低，可以说几乎是不发光的。因此能否结合硅基异质集成，在硅上制备新材料，让硅基发光？这很难，因为既要保留硅基集成电路的功能，又要让它发光。半导体发光已是重要产业，如半导体照明、激光、半导体显示等，但这些都依赖化合物半导体，成本高且与集成电路不兼容。如何在硅上利用集成电路兼容技术实现发光，成为国际难题和研究前沿。

科学家们尝试了各种方法，如多孔硅、硅纳米晶、硅有机发光等八九种路径。其中，硅基键合是一项重要技术，它先在另外的一个工艺线上把激光器做好，主要是磷化铟激光器，再通过键合将其与集成电路结合，让光进入电路，称为混合激光器。这项技术由美国英特尔公司和有关大学合作发明，已实现产业化，用于芯片间的光互联。但它未在芯片上直接制备光源，存在对准难、密度受限等问题，且与集成电路工艺不兼容。所以，这仅是做了硅基光电子的第一步。我国科学家在此领域也做了许多工作。浙江大学有关团队2007年就在硅基上通过氧化铟实现了室温电泵随机激光，这是国际首次。北京邮电大学团队在硅基磷砷和镓磷量子点激光器上取得世界先进水平成果，2023年首次实现SOI（绝缘层上硅）级的电泵激光，功率超60毫瓦，室温外推寿命超2万小时，成为国际硅基量子点领域的一大亮点。

硅材料是集成电路的基础材料，它支撑了整个集成电路的发展，也支撑了信息产业的发展。而摩尔定律的发展走到了极限，More Moore和More than Moore两个赛道上都需要硅基新材料。可以看到，硅基的纳米硅材料、硅基的异质集成的新材料、硅基光电子的新材料等，都促进了集成电路向新一代的器件发展，促进了集成电路进一步的深化发展。可以想象，在集成电路新材料的支撑下，集成电路将超越摩尔定律，为人类的信息产业、高科技产业提供基础的支撑。



学习时报与央视中国经济大讲堂合办

更多精彩内容扫码看视频

从哲学视角看待工程

□ 李伯聪

现代社会中，科学、技术、工程是三种不同的社会活动方式。科学活动以发现为核心，技术活动以发明为核心，而工程活动则以建造为核心。这三者虽各有其独特本性，但当它们与哲学相遇时，分别催生了科学哲学、技术哲学和工程哲学这三个哲学分支。值得注意的是，与科学哲学和技术哲学源自西方而后传入中国的历程不同，工程哲学在21世纪几乎同时在中国与欧美独立兴起，而且中国的步履甚至早于欧美一年或数年。作为新兴的哲学研究方向，工程哲学就是把工程作为自己研究的主要对象，对工程活动进行哲学层面的思考。

工程，作为人类的实践活动，是人类运用科技知识建造人工物（如三峡大坝、“中国天眼”、青藏铁路工程等）的活动，是现代存在和发展的基础。相比科学技术与哲学的紧密关系，工程与哲学的联系却长期被忽视。中西方历史上，普遍存在工程界不关心哲学，哲学界不关心工程的传统，致使工程界和哲学界成为两个相互隔膜甚至隔绝的领域。这主要因为，一方面，早期人们制造和使用的工具比较简单，还没有形成自觉的、专门的工程活动。直至近代科学技术兴起，随着科技的不断进步，人们才逐渐自觉地开展

专门的工程活动，工程活动逐渐成为人类社会普遍存在的一种重要的实践活动。另一方面，人们通常认为工程只是科学技术的应用，本身没有什么理论，更没有自己的哲学。事实上，工程作为现实的、直接的生产力具有本体地位，在工程活动中存在着许多哲学命题，要面对和解决许多复杂问题和重大挑战。可以说，没有工程，科学技术就无法物化或物化为人所需要的产品，人们就无法利用科学技术为社会造福，现代社会就无法运转。我国学者殷瑞钰院士等人提出的“工程哲学五论”体系框架，特别是其中的工程本体论，明确指出工程作为现实的、直接的生产力具有本体地位，并非科学的派生品，批驳了那些贬低工程、忽视工程的哲学观点和思想，明确主张工程创新是创新活动的主战场。工程需要哲学，哲学必须面向工程。在理论上弄清这个问题很重要，有助于从更深层次上认识工程的本质和地位，也有助于从工程角度提出新的哲学问题。

工程活动与人类的其他活动一样，也是人类自觉的有意识、有目的的活动，也必然会受到当时社会主流哲学思想的影响。不同的社会主流哲学思想会导致不同的工程理念，进而

产生不同的工程结果。在人类文明史上，人类创造了无数的工程技术成果，只有那些符合先进哲学理念的工程技术成果得以流传，成为人类文明的组成部分。那些与先进哲学理念相违背的工程技术成果，已经被历史淘汰，或者迟早是要被淘汰的。以往哲学对于工程的忽视，给人类带来了严重教训。例如，以往人们认为工程活动只是技术性的，是工匠们的事情，哲学家和思想家们可以不必为此操心。正是受这种哲学观念的影响，人们没有认真思考工程活动的性质、地位和作用，更没有在工程活动中自觉地贯彻人与自然和谐相处的原则，而是采取了征服自然的理念，或者简单地推崇技术决定论。这样一来，在工程活动中，人们往往只关心项目的经济效益，而没有全面、长远地考虑工程的生态效益、社会效益，结果给自然和社会带来了灾难性的后果。像咸海水利工程、苏联的切尔诺贝利核电站、埃及阿斯旺水坝等都不同程度存在各种隐患问题。这告诫我们，人类必须重新认识和认真反思工程活动的性质和理念，特别是哲学层面的反思。工程师和哲学家应相互学习，一方面，工程实践需要哲学的指导，以把握工程活动的本质和规律；另一方面，哲学的思辨和理论可以为工程提供更深层次的思考和启示，促进工程

领域的创新和发展。

从工程哲学角度看，工程是人与自然之间物质、能量和信息交换的方式。在工程活动中，人们利用自然建造人工物以满足人类需求，而这种人工物的建造过程必然会对自然环境、人类社会产生影响，有些影响是积极的，有些影响则是消极的，有的影响是牵一发而动全身的。这就要求我们在工程活动中认识和尊重规律，尽可能趋利避害。因此，从哲学层面思考对做好工程活动至关重要。比如，深入研究和分析工程决策与战略的哲学问题。如何制定科学合理的决策和战略？如何评估其风险和收益？如何确保其实施效果？这些问题都需要工程师和决策者具备哲学思维，从整体上把握工程的本质和规律。特别是辩证思维在工程咨询中具有重要的指导价值，它贯穿工程的决策、规划和评估过程。

第一，系统观。现代工程规模越来越大，涉及的因素越来越多，系统性和综合性越来越强。在复杂的工程系统中，任何人为因素和自然因素的微小变化，都可能对工程系统产生重大影响。这就要求我们在工程活动中，要有全局观念和整体意识，充分考虑各种因素对于工程系统的影响，把局部利益和全局利益、眼前利益和长远利益结合起来，努力实现经济效

益、生态效益和社会效益的统一。第二，发展观。现代工程既是现代科学技术发展的产物，又是现代社会生产力和经济水平的重要标志。然而，现代工程在给人类带来巨大利益的同时，也往往会给自然和社会带来许多新的问题。这就需要我们z在工程活动中，坚持可持续发展的理念，正确处理经济发展与人口、资源、环境的关系，在发展的同时不断解决新出现的问题，努力实现人与自然和谐相处的目标。第三，矛盾观。矛盾是普遍存在的，没有矛盾就没有世界。工程是人类利用和改造自然的实践活动，这种活动必然会引起人与自然之间的矛盾。但是，不能因此就认为人类不能开展工程活动，甚至认为应该停止工程活动。事实上，没有工程活动，就没有人类文明和社会进步。这就需要在工程活动中，树立科学的矛盾观，善于正确分析和解决各种矛盾，在不断调整各种关系中实现发展。

（作者系中国科学院大学人文学院院长教授）

