



硅时代

作者：卡德舍·斯林（KADDECHE, Slim）突尼斯迦太基大学，国家应用科学与技术研究所，材料、测量与应用研究实验室（MMA）教授。



封面图片：改编自《探索硅元素 —— 计算机的基础化学元素》（法文）一书的题图。[图片来源：© 大卫·蒙塔冯，经作者欣然许可转载]

硅是一种性质不显眼的化学元素，但它在日常生活中无处不在且不可或缺。其以二氧化硅或硅酸盐形式存在于地壳中，不仅是岩石、沙子和玻璃的组成成分，也是最先进电子元件的构成部分。硅在电子、太阳能、建筑和医疗等关键领域的重要性往往被公众忽视。然而，若没有硅，就不会有移动电话、计算机或太阳能电池板。凭借其优异的**半导体**特性，硅推动了微电子学的发展，并由此催生了数字时代。本文将从硅的宇宙起源到其前沿应用，全面地呈现硅在科学与技术领域的多面性。

目录

1. 硅：一种不显眼但普遍存在的元素	3
2. 硅的应用：一段悠久的历史	4
2.1 早期应用	4
2.2 硅的分离	4
2.3 工业进展	4
2.4 电子革命	5
2.5 当代的硅	5
3. 硅的起源与自然界丰度	6
3.1 宇宙起源	6
3.2 地球和宇宙中的丰度	6
3.3 主要矿物形式	6
3.4 硅循环	7
4. 硅的物理和化学性质	8
4.1 硅元素	8
4.2 热学与电学性质	9
4.3 化学反应性	10
5. 硅的制备：从二氧化硅到微处理器	11
6. 经济与环境挑战	13
7. 硅的未来与前景	15
8. 要点总结	16
关键词	16
参考资料及说明	16

1. 硅：一种不显眼但普遍存在的元素

在自然界中的化学元素里，硅在科学史和现代工业中占据着核心的地位（图 1）。1824 年，瑞典化学家永斯·雅各布·贝采利乌斯发现了单质硅，如今，硅（化学符号 Si）不仅因其储量丰富而得到认可，还因其在电子、能源、建筑乃至生物学等多个领域中所发挥的基础性作用而受到重视。



图 1. 贝采利乌斯超级计算机（以发现硅元素的瑞典化学家命名），位于瑞典林雪平大学，用于生命科学、机器学习和人工智能等领域的研究。该计算机于 2021 年启用，此后经过数次升级，算力提升至原来的两倍，目前其计算能力达 300 千万亿次 / 秒。[来源：图片 © Erik And30，知识共享署名 - 相同方式共享 4.0 国际许可协议，维基共享资源]

硅与氧一起是黏土和大多数岩石的基本元素，通常以硅酸盐或二氧化硅（ SiO_2 ）的形式存在。在自然界中，单质的硅极为罕见。仅在某些陨石或矿物包裹体中发现过微量的硅，但这仍属于极特殊的情况。

然而，得益于 19 世纪和 20 世纪的科学进步，研究人员已研发出复杂的提纯方法，以获取制造半导体所需的超高纯硅。这种材料已成为信息技术发展的支柱，其重要性从美国旧金山附近的“硅谷”可见一斑——这个数字创新的发源地正是因硅元素而得名。除电子元件外，硅还被用于 MEMS 传感器（即微型机电系统），这类系统将传感器和执行器集成在一块芯片上。这些传感器的应用领域广泛，包括安全气囊、智能手机和医疗设备等。

但硅的重要性并非仅限于电子领域。在建筑行业，二氧化硅自古就被用于制

造水泥、玻璃和陶瓷。在医疗健康领域，以硅为基础的聚合物——有机硅，被应用于医疗设备、假体和化妆品中。在生物学领域，尽管硅并非所有生物的必需元素，但某些物种（如硅藻以及马尾草等部分植物）会利用硅来强化其细胞结构。

归根结底，硅远不止是一种化学元素：它已成为科学与经济发展的支柱、现代文明的载体以及人类创新的象征。因此，理解硅的本质、应用、面临的挑战及发展前景，对于把握当代世界的动态、预见科技社会未来的变革而言至关重要。

2. 硅的应用：一段悠久的历史

2.1 早期应用

硅在自然界中无处不在。以二氧化硅（ SiO_2 ）或硅酸盐形式存在的硅，约占地壳组成的 28%，是地壳中含量仅次于氧的元素。燧石的使用与人类历史紧密相连。“硅”这一术语便源自“燧石”的拉丁语名称。黏土的使用也始于人类早期（参见《[黏土：令人惊讶的天然纳米材料](#)》）。人类将黏土转化为赤陶和陶瓷的历史至少可追溯至 2 万年前。古埃及人和古罗马人已懂得利用沙子（主要成分为二氧化硅），与苏打和石灰一起经约 1000°C 高温加热来制造玻璃（参见《[玻璃：持久性的材料](#)》）。

2.2 硅的分离

1824 年，瑞典化学家永斯·雅各布·贝采利乌斯首次成功分离出纯硅。他通过将氟硅酸钾（ K_2SiF_6 ）与金属钾共热，得到了棕色的无定形硅。他的研究为无机化学的进一步发展奠定了基础。然而，我们用于制造半导体的晶体硅则是在很久之后才被制备出来。直到冶金学和化学取得进展，人们才得以获得纯净且结构规整的硅晶体。

2.3 工业进展

在整个 19 世纪和 20 世纪初，硅主要用于钢铁及某些合金的制造，以提高其强度和耐用性。20 世纪上半叶，研究人员开始探索硅独特的电学性质。20 世纪 40 年代，首批晶体管研制时使用的是锗（另一种半导体），因为锗更容易提纯。但科学家们很快意识到，硅因其储量丰富且热性能更优异，是更具潜力的选择——硅具有良好的导热性，可实现散热，且低膨胀特性减少机械应力。

2.4 电子革命

硅的真正转折点出现在 20 世纪 50 年代，这要归功于威廉·肖克利及其同事的研究——他们发明了晶体管。德州仪器和仙童半导体是最早生产硅基晶体管的公司。1958 年，杰克·基尔比研制出首个集成电路，由此开启了微处理器时代。借助外延生长和光刻等技术，硅确立了其作为微电子学基础材料的地位：这些技术通过在真空环境下将薄层材料蒸发到硅衬底上生成晶体，并结合选择性化学蚀刻来绘制电路。硅之所以特别适合这些工业制程，是因为通过直拉法（参见第 5 节）可将其制成纯度极高的单晶体，进而生产出完全适配半导体行业的硅片（图 2）。

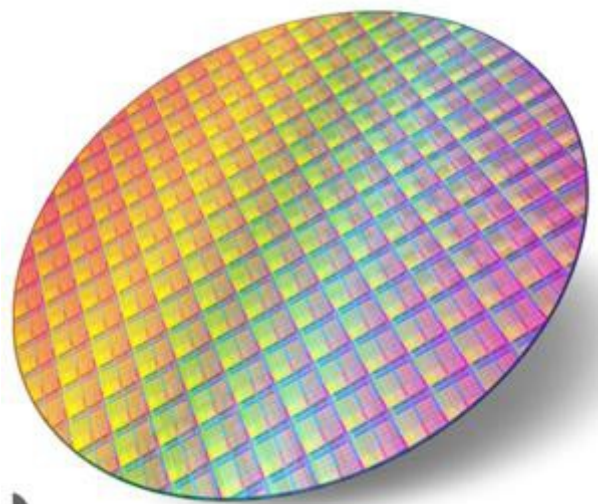


图 2. 带有蚀刻集成电路的硅片（直径 20 厘米）[来源：DR]

2.5 当代的硅

如今，几乎所有的微处理器、电子芯片和太阳能电池板均由硅制成。硅的电学特性——尤其是通过掺杂（添加硼或磷等杂质）即可轻松地改变其导电性这一特点，使其成为制造二极管、晶体管、光伏电池和集成电路的不可替代的材料。在工业领域，硅被用于多种合金，尤其是铝硅合金——这类合金因兼具轻便与高强度的特性，被应用于汽车和航空航天工业。在化学领域，硅是有机硅制造的基础原料，这种具有柔韧性和耐腐蚀性的合成聚合物被用于化妆品、医疗设备、防水处理及建筑等领域。最后，在材料科学和基础研究中，硅是理解晶体结构、电子相互作用及材料在纳米尺度下行为的典型模型。在这一尺度下，量子力学效应开始发挥作用，为基于全新原理研发的量子计算机带来了可能[1]。硅凭借其多功能性与丰富的天然储量，成为当前科技时代最具战略意义的元素之一。

3. 硅的起源与自然界丰度

无论是从丰度还是其在类地行星组成中所扮演的角色来看，硅都是宇宙中最基础的元素之一。它的宇宙起源、在地壳中的丰度以及多样的自然存在形式，使其成为行星化学和地质学领域的核心研究对象。

3.1 宇宙起源

硅源于宇宙中最壮观的核反应——恒星聚变。在大质量恒星内部，演化至生命末期时，氧核（含 8 个质子）与碳核（含 6 个质子）会在极端温度和压力下发生聚变，形成硅（含 14 个质子）。这一阶段通常发生在恒星以超新星形式最终坍缩之前。超新星爆发时，大量硅与其他重元素被抛射到星际空间，这些物质丰富了气体和尘埃星云，成为新恒星、行星及其他天体形成的原材料。因此，地球上所有的硅（如同大多数元素一样），实际上都是死亡恒星留下的产物。

3.2 地球和宇宙中的丰度

按质量计算，硅是宇宙中第八大丰富元素，仅次于氢、氦、氧、碳、氖、铁和氮。其较高的核稳定性及其在核合成过程中所起的作用，解释了它在宇宙中具有较高丰度的原因。因此，硅是所有类地行星的基本组成元素。在陨石中，硅与氧、镁、铁结合而存在。在地壳中，硅以硅酸盐矿物的形式存在，是地壳中第二丰富的元素，占地壳总质量的 27.7%，仅次于氧（46.6%）。深入地球内部，地幔也主要由硅酸盐组成，尤其以橄榄石和辉石的形式存在。地核是由铁的合金组成，但可能也含有硅，只是其比例远低于地球上层圈层。

需要指出的是，尽管硅在地球表层含量丰富，但在地球的大气层中却几乎不存在。其存在形式几乎仅限于悬浮的细矿物粉尘。这些矿物颗粒可能对人类呼吸系统健康产生有害影响。石棉就是一个众所周知的例子，它是一种从岩石中提取的纤维状的硅酸盐。

3.3 主要矿物形式

在自然状态下，硅几乎从不以游离元素的形式存在，主要以二氧化硅（ SiO_2 ）和复杂硅酸盐的形式存在。其主要矿物形式包括：

- 石英 (SiO_2 , 见图 3A)：一种极为常见的矿物，是沙子和许多岩石的主要成分。存在多种微晶变种，如玉髓、碧玉和玛瑙。
- 长石（如正长石、钠长石，见图 3B）：铝、钾、钠或钙的硅酸盐。
- 云母、辉石、角闪石：其他硅酸盐矿物族，存在于火成岩、变质岩和沉积岩中。
- 花岗岩（见图 3C）等火成岩富含石英和长石。
- 沙子、黏土及其他沉积物：主要由石英颗粒组成。



图 3. A. 石英，摄于法国勒布尔-德瓦桑的拉加代特矿 [来源：图片© Didier Descouens，知识共享署名-相同方式共享 4.0 国际许可协议，via 维基共享资源]；B. 长石 [来源：图片由美国地质调查局提供，属于公有领域，via 维基共享资源]；C. 花岗岩（DR）。

在土壤中，硅是黏土矿物的组成成分，而黏土矿物对土壤肥力至关重要。黏土土壤能保持水分以及植物生长所需的矿物质（不过，黏土含量过高可能导致土壤板结，产生不利的影响）。

3.4 硅循环

硅参与自然的生物地球化学循环。在海洋中，某些被称为硅藻的微藻会利用水合二氧化硅构建外壳（参见《塔拉海洋科考队探索浮游生物的多样性》）。当这些生物死亡后，其外壳沉入海底，成为富硅沉积物的一部分，从而维系着自然的硅循环[2]。尽管对于陆地生命形式而言，硅并非像碳或氮那样是必不可少的元素，但它在某些生物结构中发挥着重要作用。除硅藻外，草本植物等植物会在其组织中积累硅，以强化自身结构，抵御植食性动物的侵袭和环境胁迫[3]。随后，硅被返还至土壤并溶解于河流中，参与陆地硅循环[4]。

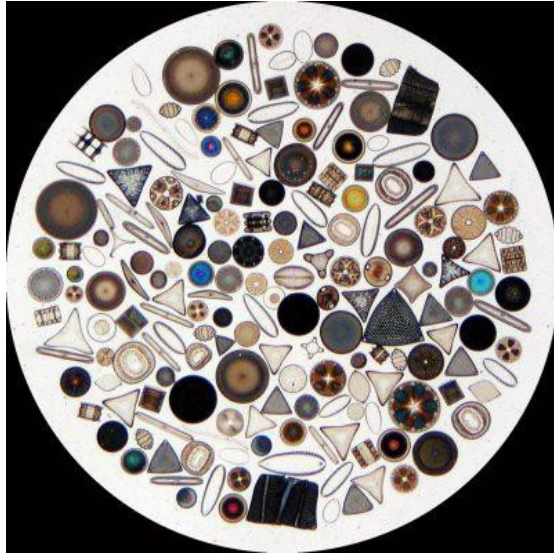


图 4. 属于原生生物类群的单细胞微藻的硅藻 [来源：图片© Wipeter，知识共享署名-相同方式共享 3.0 许可协议，维基共享资源]

4. 硅的物理和化学性质

硅独特的物理和化学性质，使其在电子、光伏乃至建筑行业中占据着重要的地位。下面我们来探究其基本特性。

4.1 硅元素

硅是原子序数为 14 的化学元素，这意味着其原子核由 14 个质子构成，中性原子中则有 14 个电子与之对应。原子核中还含有中子，在主要同位素中含有 14 个中子，因此质量数为 28，记为 ^{28}Si 。此外，还存在含有 1 个或 2 个额外中子的同位素 ^{29}Si 和 ^{30}Si ，但其占比很小（分别约为 5%和 3%）。与所有原子一样，硅的电子排布在同心电子层中。第一层有 2 个电子（已填满），第二层有 8 个电子（也已填满）。剩余的 4 个电子位于未填满的最外层，因此能够与相邻原子的电子配对，形成 4 个化学键。因此，硅的化学性质与碳相似——碳同样有 4 个外层电子（总共有 6 个电子）。

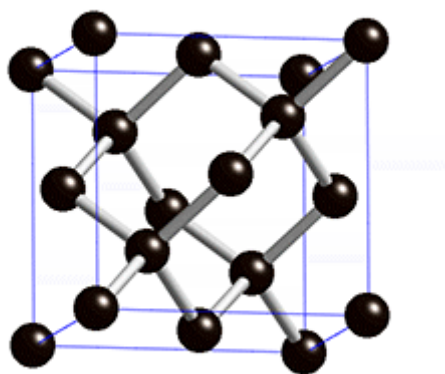


图 5. 面心立方结构中的四面体堆积 [来源：原始上传者：Brian0918，CC0（公有领域），
via 维基共享资源]。

纯硅的晶体结构与金刚石相似，每个原子与相邻原子形成四个键，构成四面体结构。这些四面体堆叠形成一种名为“面心立方”的结构（如图 5 所示）。在这种纯晶体形式下，硅的密度为 2.33 克/立方厘米，比铁或铜等金属都轻，但比大多数有机材料密度要大，这与其中等原子质量有关。硅酸盐岩石的密度也接近 2.5 克/立方厘米。

4.2 热学与电学性质

硅的熔点为 1414°C，沸点为 3265°C。它具有良好的导热性：单晶硅的导热系数为 150 瓦/（米·开尔文），几乎是铜的一半，这有助于电子设备的散热。此外，硅的热膨胀系数低，这对于需要尺寸稳定性的应用来说也是一个优势。



图 6. 一块提纯后的硅 [来源：DR]

纯硅呈蓝灰色，具有略带光泽的金属外观（图 6）。在薄层状态下，硅具有一定的透明性，尤其对某些红外波长的光而言，这一特性在光电子器件中得到了利用。这些光学特性与其电学特性相关。

硅是一种本征半导体，这意味着在纯态下，它具有一定的导电性，尤其在受热或受光时更为明显。在热扰动作用下，外层电子有很小的概率脱离束缚，在晶体中自由移动，从而实现导电。这种电子的运动被称为“跨越禁带”。在 300 开尔文（27°C）时，硅的禁带宽度为 1.12 电子伏特（eV），即电子必须具备相当于 1.12 伏特电势差的动能才能跨越这一能垒。

这一能量壁垒约为常温下与热扰动相关的电子平均能量的 10 倍，因此电子自发跨越的概率微乎其微。因此，纯硅的导电性极低（仅为铜的十亿分之一）。然而，硅的导电性可通过掺杂（即引入磷或硼等杂质）来改变：磷会引入带负电的传导电子（n 型掺杂），而硼则会吸收电子（p 型掺杂）。通过这种方式，可制造出二极管——它允许电子从 n 型掺杂区流向 p 型掺杂区，却不能反向流动。在晶体管中，电流还会受到第三个电极的控制，使其起到电子开关的作用。这正是所有电子和计算机系统的工作基础。在光伏电池中，可见光光子提供的能量约为 2 电子伏特，这使得光能够高效地转化为电能。

需要注意的是，这些电子特性对晶体的初始纯度和质量极为敏感。当暴露于高剂量辐射时（例如在卫星或核反应堆中），硅的晶体结构可能会产生缺陷，从而改变其电子特性。目前，科研人员正深入研究以理解并限制这些影响。

4.3 化学反应性

纯硅在室温下相对惰性，不与空气或温度低的水发生反应。这是因为其表面会形成一层薄薄的氧化硅（ SiO_2 ），保护下层材料免受进一步氧化，这种行为与铝的钝化类似。

在温度高于约 700°C 时，硅会与氧气反应生成二氧化硅（ SiO_2 ）。在中等温度下，硅还能与卤素（氟、氯、溴、碘）反应，生成四氯化硅（ SiCl_4 ）等硅卤化物，这类物质在化学工业中用途广泛。

硅对大多数酸（即使是浓酸）具有抗性，但氢氟酸（HF）除外——氢氟酸会侵蚀 SiO_2 层，形成可溶性络合物。硅与热的浓强碱（如氢氧化钠 NaOH）反应，

会生成可溶性硅酸盐并释放氢气。硅能形成多种化合物，包括：

- 硅酸盐：由硅、氧与铝、镁、钙、钠或钾等金属结合而成，是岩石的主要成分。
- 碳化硅（SiC）：硬度极高且耐磨损，用于磨料和功率半导体。
- 聚硅烷：含 Si-Si 链的聚合物，应用于先进电子领域，类似有机聚合物，硅原子扮演着碳的角色。
- 有机硅：基于 Si-O-Si-O 链的聚合物。

总之，硅是一种兼具独特物理性质（可控的半导体导电性、热稳定性、机械强度）和化学性质（可调节的反应性、能形成保护性氧化物）的材料，这使其成为现代工业的支柱。硅适应不同化学和物理环境的能力，确保了它在众多新兴应用中拥有光明的前景。

5. 硅的制备：从二氧化硅到微处理器

硅的生产是一个复杂的过程，它将自然界中储量丰富的二氧化硅（SiO₂）转化为现代电子领域必不可少的超高纯材料。二氧化硅作为沙子的主要成分虽储量丰富，但工业上为追求更高的纯度，会从石英矿中提取[5]。生产过程始于二氧化硅的化学还原：在电弧炉中，二氧化硅与碳（以焦炭形式存在）在约 2000°C 的高温下发生反应，生成冶金级硅，反应式为 $\text{SiO}_2 + 2\text{C} \rightarrow \text{Si} + 2\text{CO}$ 。这种粗硅的纯度通常在 98%-99% 左右，无法满足电子应用的需求（见图 3）。因此，需要通过西门子法进一步提纯：先将硅转化为气态三氯氢硅（HSiCl₃），再通过分馏提纯；随后，提纯后的气体在高温反应器中受热分解，重新沉积出纯度极高的硅（纯度达 99.9999999%，即“9 个 9”纯度）。通过这种方法得到的硅为无定形或多晶硅。

为获得电子元件所需的单晶体，需采用直拉法（如图 7 所示）：将一粒籽晶浸入熔融的硅中，缓慢旋转并向上提拉，形成长条形的单晶圆柱体（称为晶锭，如图 8）。之后，晶锭被切割成几毫米厚的薄片，即硅片（如图 8 所示）。这些硅片经过抛光和处理后，成为集成电路的衬底（参见图 7）[6]。

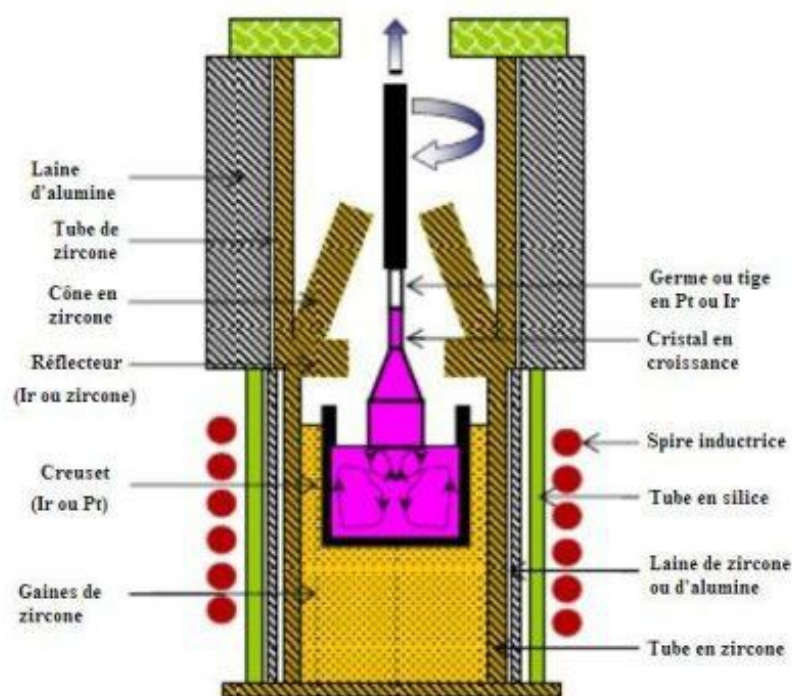


图 7. 直拉法结晶装置示意图（来源：西蒙·伊拉斯的博士论文，巴黎第六大学，参见参考文献[6]）

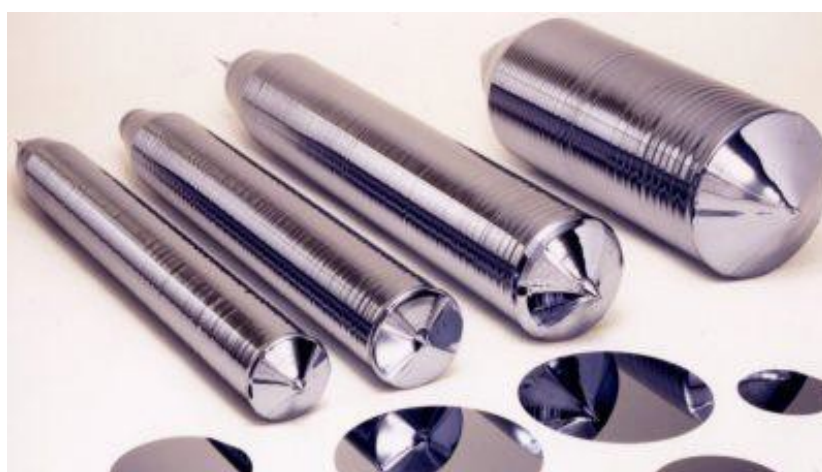


图 8. 硅晶锭为银色圆柱体，标准直径为 10 至 30 厘米，随后被切割成称为硅片的薄片。

在电子器件的制造过程中，硅会通过引入磷（n 型）或硼（p 型）等元素进行“掺杂”，从而精确调节其电导率。光伏用硅的生产流程与之类似，但对纯度的要求略低——出于成本考虑，多聚焦于多晶硅的生产。如今，行业正探索定向凝固或直接从熔池中制造薄片等替代技术，以减少材料损耗并提高能源利用效率。总之，硅的生产是工业化学、精密冶金与晶体学工艺控制的完美结合。

6. 经济与环境挑战

硅在全球经济中扮演着关键角色，这既体现在其对重点工业领域的直接贡献上，也反映在其引发的地缘政治战略动态中。作为半导体行业的主要基础材料，硅支撑着一条极其广泛的价值链，涵盖电子芯片设计、集成电路制造（图 9）以及将这些芯片集成到智能手机、计算机、联网汽车和医疗设备等日常消费品中。这个价值数千亿欧元的行业，是数字经济和技术创新的核心。2019 年，全球硅产量达 400 万吨，其流向详见法国地质与矿业研究局（BRGM）的报告[7]。其中，电子和光伏应用占比不到一半，而在金属合金和有机硅合成等更传统的用途中，硅的使用量仍占主导地位。

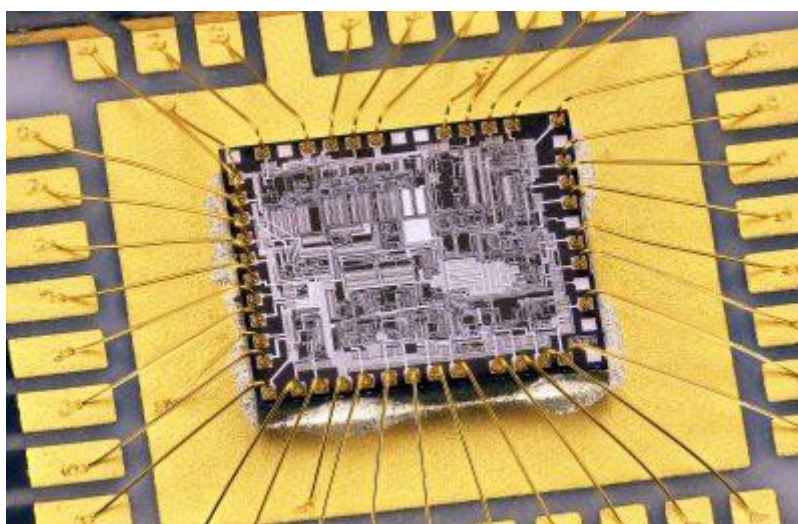


图 9. 摩托罗拉 GM350 集成放大器/解调器收发电路 [来源：图片© Mister rf，知识共享署名-相同方式共享 4.0 国际许可协议，via 维基共享资源]。

大部分硅产自中国（占比超 60%），其次是俄罗斯、美国和挪威。硅的精炼，尤其是电子级硅（9N 纯度）的精炼，由少数工业巨头主导。从采矿到还原、提纯再到结晶，每个环节都会对环境造成影响。粗硅生产的能耗为 11 千瓦时/千克，接近铝的生产能耗。然而，要达到电子级硅所需的纯度，能耗约为 150 千瓦时/千克[8]，此外还需加上将其转化为单晶锭和切割过程中的能耗。这种能耗带来的环境影响（尤其是二氧化碳排放）在很大程度上取决于生产地点。

除能源消耗外，硅的开采会导致环境破坏、产生细粉尘，有时还会损害当地生物多样性。硅的提纯（尤其是生产电子级或太阳能级硅时）需要极高的温度（高达 2000°C），并会使用化学试剂（如三氯氢硅或氯气），若排放控制不当，这些试剂会成为空气和水污染的源头。硅片加工前的清洗需要大量超纯水，通常为 20

升/平方厘米，但这些水会被无污染地（甚至经过净化后）排放回环境中。

主要的硅加工产地分布在中国（全球领先）、美国、德国、日本，以及近年来新兴的越南和马来西亚。另一个环境影响来源与电子废弃物的处理有关，这类废弃物中含有大量硅。全球范围内，电子元件的回收利用率仍然较低，部分原因是印刷电路板的拆解难度较大。

最后，若处理不当，硅片或太阳能电池生产厂可能会产生化学废水（酸、溶剂等）。因此，尽管硅的应用（太阳能、数字技术等）具有益处，但硅产业必须通过开发更清洁的生产工艺和加强全球回收能力，来应对减少生态足迹的挑战。鉴于硅资源丰富，其回收率目前仍较低，但正在逐步提高，尤其是在太阳能电池板的回收方面。



图 10. 硅基光伏太阳能电池板 [来源：DR]

此外，全球能源转型正将硅置于可再生能源发展的核心位置，尤其是通过光伏电池板（图 10）——其全球市场正经历指数级增长。这引发了对硅开采、提纯和加工的大规模投资，尤其是在中国、美国、德国和法国等国家。

硅的经济机遇还延伸至化学工业，例如用于建筑、医疗、电子乃至农业食品领域的有机硅。此外，人工智能、5G、数据中心和量子技术的爆发式发展，正使

我们对性能日益强大的电子元件的依赖度不断提高，而硅仍是这些元件的基本组成部分。因此，对这一战略资源的掌控正成为一个重大经济议题，它不仅决定着各国的产业竞争力，也影响着它们在日益数字化的世界中的技术主权。

7. 硅的未来与前景

硅的未来充满希望，同时也面临复杂挑战，它正处于技术创新、能源需求与地缘政治挑战的交汇点。尽管目前硅在微电子和光伏技术中的应用占据主导地位，但新的发展前景正在重塑其应用边界。

在半导体领域，电子元件向极致微型化（蚀刻尺寸小于 3 纳米）的推进不断挑战硅的极限，尽管人们已开始探索石墨烯、氮化镓（GaN）等其他“宽禁带”半导体材料以提升性能。然而，凭借储量丰富、工业成熟度高及完善的生产生态系统，硅依然不可或缺。

在光伏领域，全球对清洁能源的需求日益增长，推动太阳能市场快速扩张。基于晶体硅的电池凭借其效率和可靠性，在大规模应用中难以被替代。目前，关于硅与钙钛矿结合的叠层光伏电池的研究正在推进，有望实现更高的转换效率[9]。

人工智能、云计算、自动驾驶汽车中的嵌入式电子设备以及航天技术的兴起，进一步加剧了全球对硅基集成电路的依赖。但这种依赖也给供应链带来压力，使得发展本地硅生产和回收产业成为战略重点。

硅仍是未来技术的核心，其发展前景体现在与其他材料的混合应用、制造工艺的优化，以及在全球生态与数字转型中扮演的核心角色。

在人工智能、未来计算机（量子计算机）和高性能太阳能电池等新技术中，科学家们正通过改变硅的形态来进一步改进这种广泛使用的材料，使其性能更优。

总之，硅的发展史是一种普通材料跃升为现代文明基石的历程。它适应技术发展的能力，使其成为当代工业革命的重要参与者。

8. 要点总结

- 硅与氧结合，是大多数岩石的主要成分，因此在地壳中储量丰富。
- 凭借优异的特性，硅处于数字革命的核心地位，是制造半导体的关键材料，而半导体是电子和计算机系统的支柱。
- 硅也是全球能源转型的核心，为光伏技术的发展提供支撑。
- 硅还应用于许多创新产品和材料中，例如医疗假体。
- 因此，硅是支撑经济、工业和当代技术发展根基的重要材料。
- 对硅的依赖日益加深，引发了重大的地缘政治、环境和经济问题，这要求我们思考其可持续生产、安全供应和回收利用等问题。

关键词

- **外延生长：**指通过与预先存在的单晶衬底对齐，生成单晶（原子或分子的周期性堆叠结构）的过程。分子束外延技术用于在硅片上制造单晶半导体层：该技术通过真空蒸发产生蒸汽并镀到衬底上，在适当的气流和温度条件下，原子逐渐沉积在单晶衬底上，并与硅原子的周期性结构对齐，形成与衬底结构一致的晶体层。
- **光刻：**指通过复制图像来蚀刻衬底的一系列操作，是电子集成电路制造中的关键技术。第一步是在硅片等衬底表面沉积一层薄薄的光敏树脂（光刻胶）；随后，通过蒸镀由不透明和透明区域组成的掩模（根据待复制的图案设计）对其进行曝光。受照射的树脂会变得易被溶剂溶解，或相反变得具有抗溶性（取决于所选树脂类型），从而能够按照投影掩模的图案蚀刻出电路。

参考资料及说明

- [1] Quantique sur silicium, CEA Leti, Press release, 2021 (in french)
- [2] Tréguer, P., Bowler, C., Moriceau, B. et al. (2018) Influence of diatom diversity on the ocean biological carbon pump. Nature Geosci. 11, 27–37. <https://doi.org/10.1038/s41561-017-0028-x>
- [3] Phytoliths are various forms of silica concretions found in plants or plant remains, which may

be fossil-ised.

[4] Meunier J.-D. (2003), Le rôle des plantes dans le transfert du silicium à la surface des continents. C. R. Geoscience 335, 1199-1206.

[5] Silicium, in the Elémentarium (in french, Universal reference system to which all types of physical and chemical behaviour of elements can be related.)

[6] Doctorate dissertation, Simon Ilas, Univ. Pierre et Marie Curie, <https://theses.hal.science/tel-01020851v1> (in french)

[7] Chaîne de transformation et commerce du silicium métal, BRGM (in french)

[8] Le silicium : un élément chimique très abondant, un affinage stratégique, Minéral Info, Le portail français des ressources minérales non énergétiques (in french)

[9] Green, M. A., Dunlop, E. D., Hohl - Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., & Hao, X. (2024). Solar cell efficiency tables (version 63). Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 32(1), 3–22 DOI: 10.1002/pip.3709.