

持续发展：半导体行业芯片绿色精益制造

新建的现代化绿地工厂可助推行业改善碳排放，而制造转型可赋能绿地工厂和现有棕地工厂降低能源、水和工艺气体使用强度。

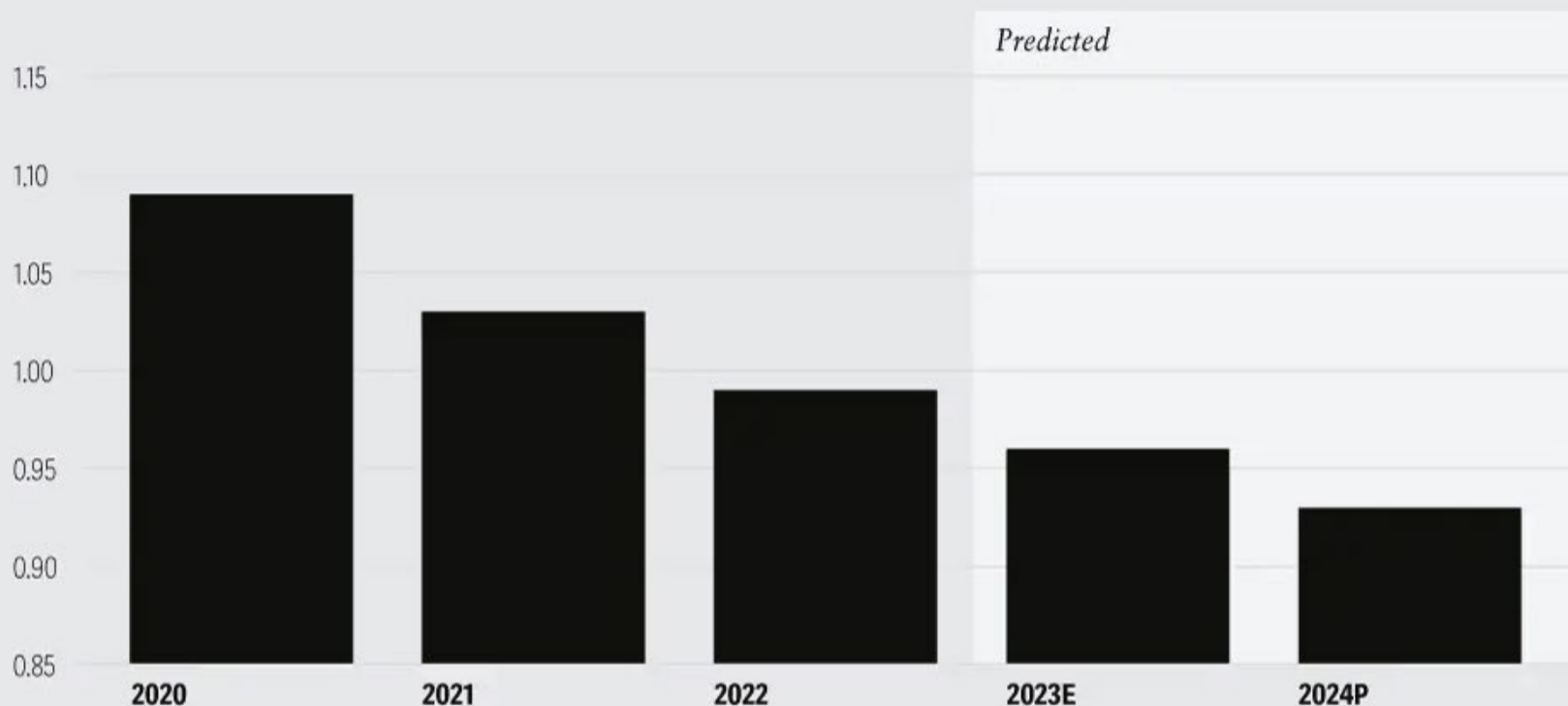
众所周知，半导体制造业具有不稳定性：截至2023年秋季，该行业处于自1990年以来的第七次衰退期。¹以美元计算，2023年芯片行业收入预计将下降10%，2024年预计将增长12%。²也许不足为奇的是，当芯片行业萎缩时，其对能源、水和全球变暖潜能值 (GWP) 较高的工艺气体的使用量均有所下降。而当行业发展时，全球变暖潜能值则会上升。可持续发展的绝对衡量标准往往是无益的，尤其是对于一个尽管不稳定但仍将增长的行业，预计2030年收入将超过1万亿美元，³几乎是2023年5,150亿美元行业收入估值的两倍。

相反，更好的衡量标准可能是资源消耗强度：与今年相比，明年每创收一美元，能源、水和GWP较高的工艺气体的使用量如何？德勤预计，2024年平均用水强度 (图1) 和用能强度都将逐年下降，资源消耗强度也将下降，主要芯片制造商的可再生能源使用比例将有所增长。

图1: 资源消耗强度是衡量行业在实现气候目标方面进展的更佳标准

用水强度, 两年移动平均值, 2020-2024 年 (用水量/收入)

● Water intensity (kilo of water consumed/US\$ dollar of revenue)



注: E表示估计值; P表示预测值: 用水强度 (两年移动平均值) 按总用水量 (百万吨) 与半导体行业总收入的比率计算。

资料来源: 用水数据来自11家半导体上市公司 (来自北美、亚洲和欧洲; 包括集成器件制造商 (IDM) 和代工厂, 涵盖存储、逻辑和模拟芯片) 公开发布的企业社会责任 (CSR) 报告, 且这些公司的重要生产活动遍布全球。收入数据基于世界半导体贸易统计组织 (WSTS) 公布的整个半导体行业的年度数据 (2020-2022年) 和收入估计值/预测值 (2023-2024年)。

方法: 2021年和2022年的实际用水强度分别同比下降了6%和4%, 我们估计2023年的用水强度将同比下降3% (相对保守), 并预测2024年的用水强度将再次下降3%。

Deloitte Insights | deloitte.com/insights

资源消耗强度降低部分得益于持续十年之久的趋势, 近年来该行业一直致力于推进半导体行业的可持续发展。新建芯片工厂 (绿地工厂) 不断涌现亦是部分原因: 正如预期的那样, 新建工厂的各种设备、工具和工艺 (在其他条件相同的情况下) 通常比5年、10年甚至20年前的同等技术更具可持续性。尽管如此, 采用先进节点技术的新建工厂对行业可持续发展构成了挑战: 从28纳米制造等成熟技术过渡到2纳米先进节点制造, 能源消耗量为以前的3.5倍, 用水量为以前的2.3倍, 温室气体排放量为以前的2.5倍, 且随着工艺越来越先进, 预计这一趋势还将继续。⁴有趣的是, 行业在推进可持续发展方面取得进展更多得益于对那些老旧工厂 (棕地工厂) 实施制造转型: 德勤预计, 完整的制造转型项目可在多年时间内大幅降低能源、水和工艺气体的使用强度。

仍需采取更多举措

从芯片所有阶段的能源和资源使用情况来看，制造只是面临挑战的部分阶段。芯片制造完成后的能源消耗（例如，在耗电的数据中心实施生成式人工智能）也是面临的一大挑战。同样，资源提取、测试和封装、分销、生命周期和项目终止都是推动半导体行业实现可持续发展的重要阶段。

虽然一些芯片制造商制定了2030年零碳排放等雄心勃勃的可持续发展目标，但全球情况却大相径庭。一般来说，总部位于欧盟的公司往往制定了最雄心勃勃的2030年目标，而一些总部位于美国的公司也制定了类似的宏伟目标，其他公司制定的目标则推迟至2040年及以后。⁵

除新加坡外，大多数总部位于亚洲的芯片制造商均制定2050年及以后的目标，或者未制定目标。⁶尽管如此，在2023年9月，一家亚洲领先的芯片制造商承诺到2040年100%使用可再生能源，比原计划提前了10年。⁷

2021年，芯片行业的二氧化碳排放量约占全球二氧化碳排放量的0.2%。⁸随着产业规模实现翻番，如不希望到2030年这一比例增加一倍，达到0.4%，则应改善绿地工厂并改造棕地工厂。

能源消耗

芯片制造能源消耗巨大。熔化硅、使用大功率激光进行光刻、创造和维护真空状态以及持续清洁工作耗电巨大：半导体制造厂每小时耗电量高达100兆瓦时，⁹相当于8万多户北美家庭的用电量。尽管如此，目前只有大约500座开放式晶圆厂。¹⁰

虽然从现在到2025年还会新建工厂，但全球仅有41座晶圆厂。¹¹此外，半导体公司还采用了新型芯片设计技术和先进的工艺技术，例如，使用低漏电晶体管和低功耗系统，切换系统电源模式（如选择当模块/IP不工作时切换至关机、待机、休眠模式）。这些措施有助于减少各行业终端设备和系统的能源需求，但随着制造业务不断扩大，该行业应探究其他方法来优化资源利用和降低排放。

在减少能源消耗和相关碳足迹方面，芯片行业有两个杠杆可以拉动。首先，该行业正努力提高能源效率，但通常进展缓慢，尤其是当芯片公司采用越来越先进的制造技术来突破半导体制造的限制时更是如此。¹²

芯片行业可采取的措施包括提升除当前芯片制造工艺外其他工艺流程的能源效率和速度：LEED认证建筑是一项成熟的技术，该行业十年来一直使用该技术来提高可持续发展能力。¹³该行业还希望增加可再生能源的使用：举例来说，截至2022-2023财年，一家总部位于美国的大型芯片制造商93%的能源需求由可再生能源满足。¹⁴然而，在三家规模最大的芯片企业中，2022年可再生能源仅占能源结构的28%，比2021年增加了五个百分点。¹⁵

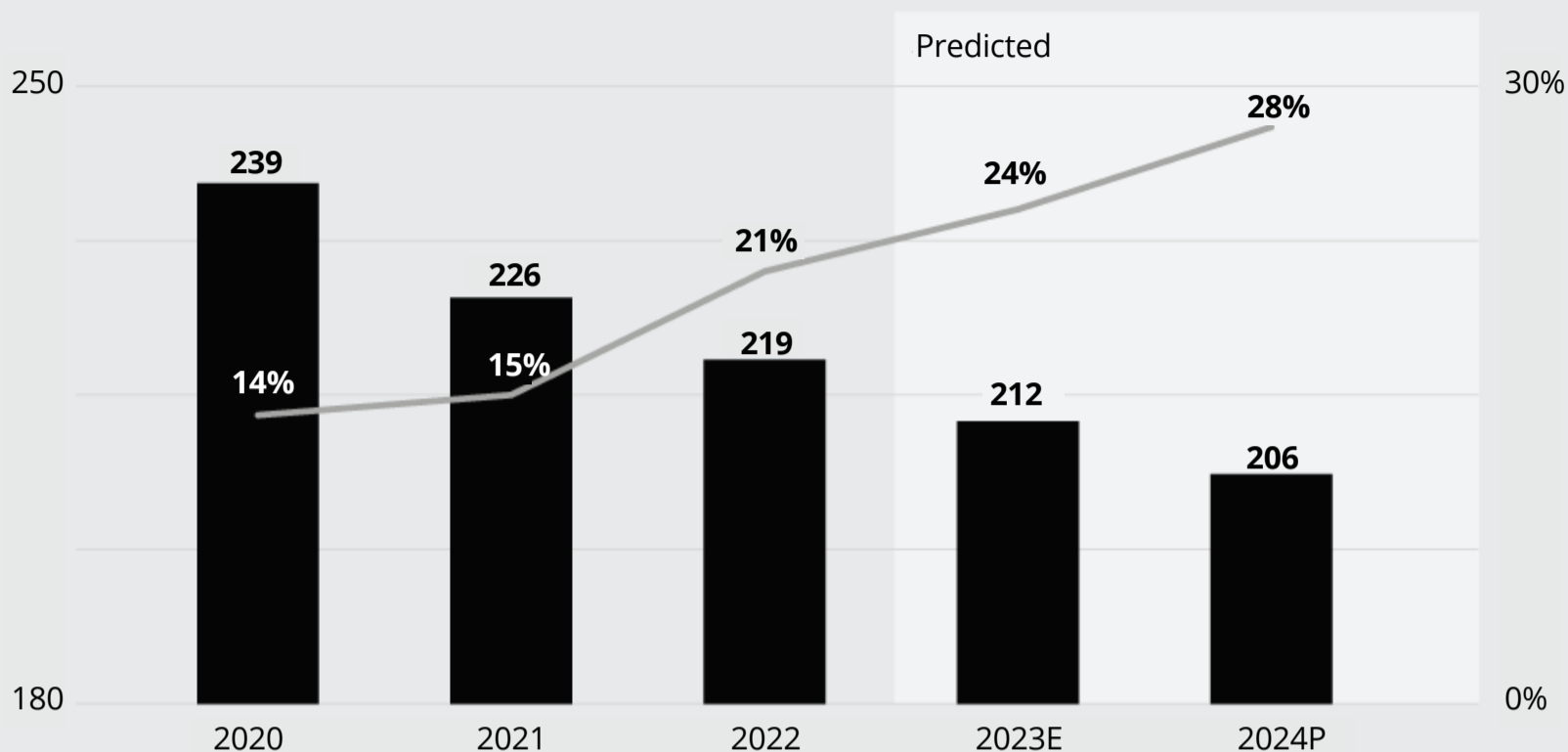
将这两个杠杆结合起来，可使该行业晶圆厂的能源消耗强度（瓦时/美元）从2020年的近240降至2022年的219，预计2024年将降至206（图2）。¹⁶此外，可再生能源使用比例预计将以高于能源消耗强度降幅的速度上升：预计到2024年，可再生能源将占能源构成的28%，是2020年的两倍。

图2: 可再生能源是降低能源消耗强度的关键

2020-2024年能源消耗强度与可再生能源使用比例

● 能耗强度两年移动平均值 (瓦时/收入 (美元))

— 可再生能源使用比例



注: E表示估计值; P表示预测值。能源消耗强度(两年移动平均值)按总能耗(千兆瓦时)与半导体行业总收入的比率计算。可再生能源使用比例按可再生能源总消耗量(千兆瓦时)占所有能源总消耗量的百分比计算。

资料来源: 能源消耗强度数据来自11家半导体上市公司(来自北美、亚洲和欧洲; 包括集成器件制造商(IDM)和代工厂, 涵盖存储、逻辑和模拟芯片)公开发布的企业社会责任(CSR)报告, 且这些公司的重要生产活动遍布全球。收入数据基于世界半导体贸易统计组织(WSTS)公布的整个半导体行业的年度数据(2020-2022年)和收入估计值/预测值(2023-2024年)。可再生能源使用比例趋势线基于8家半导体上市公司(来自北美、亚洲和欧洲, 包括集成器件制造商和代工厂, 涵盖存储、逻辑和模拟芯片)的汇总数据, 这些公司公布了其可再生能源的年消耗量, 且其重要生产活动遍布全球。

方法: 2021年和2022年的实际能源消耗强度分别同比下降了5%和3%, 我们估计2023年将同比下降3%, 并预测2024年能源消耗强度将再次下降3%。本报告重点介绍了我们基于研究的假设和支持预测的依据。同样, 在2020年至2022年期间, 可再生能源的使用比例平均每年增长三个百分点(pps), 鉴于半导体公司为加大使用可再生能源采取持续措施, 我们预测可再生能源消耗量占能源总消耗量的比例将在2023年和2024年继续每年增长3-4个百分点。

Deloitte Insights | deloitte.com/insights

用水量

2019年, 全球芯片行业用水量达2,640亿加仑(约1万亿升)¹⁷ 但是, 尽管根据地理位置和芯片制造商的不同, 部分水资源会因蒸发或其他原因而损失, 损失的全部水资源均未被“使用”: 一家总部位于美国的大型芯片制造商2021年的用水量为160亿加仑, 但循环水量达130亿加仑(循环利用率超过80%), 节水量比两年前翻了一番。¹⁸台湾地区的芯片制造商在2016年至2020年期间的平均水循环利用率为85%。¹⁹

半导体行业的大部分用水用于制造过程(76%), 但也有大量水用于冷却塔(9%)和洗涤剂(11%)。²⁰这些洗涤剂大部分用于工艺气体减排(见下一章节), 可为节水带来大量机会: 在不主动处理时, 将减排系统切换至待机模式, 可减少98%的用水量。²¹还可在减少工艺水和冷却水方面进行改进。

工艺气体

芯片行业使用多种气体，其中一些气体的全球变暖潜能值 (GWP) 极高。这些气体主要包括用于蚀刻和清洗的全氟碳化物 (PFC)、氢氟碳化物 (HFC)、三氟化氮 (NF₃) 和六氟化硫 (SF₆)，²²以及用于沉积和净化过程的氮氧化物气体。²³例如，六氟化硫的全球变暖潜能值是二氧化碳的23,500倍。²⁴根据美国国家环境保护局 (EPA) 的历史数据，“10%至80%的含氟温室气体在通过制造工具室时未发生反应，而是被释放到空气中。”²⁵

可采取三个主要方法减少这些气体的影响：改进工艺/源头削减、替代化学品和销毁技术（通常称为减排）。²⁶一般来说，就第一类方法而言，许多易于实现的改进机会可能已经付诸实践，但在边缘领域仍有待改进，而这正是制造转型可产生影响的领域。在寻找替代化学品方面取得了一些成功：一些PFC被NF₃所取代，虽然仍存在问题，但已有所改进。²⁷然而，寻找制造工艺替代气体并确认其符合标准是一个缓慢的过程，只有少数替代气体即将取得突破，如G1。²⁸在此方面，减排仍然是主力军：关键是尽可能多地捕获和销毁（通常是通过燃烧或转化）高GWP工艺气体。例如，减少99%的NF₃或可实现，且优于95%。²⁹总体而言，由于纯度、成本以及与辅道生产曾 (sub-fab) 物理足迹整合的能力等问题，工艺气体通常不会被再利用或再循环。³⁰

全氟和多氟烷基物质 (PFAS)

芯片行业还使用或生产多种全氟和多氟烷基物质 (PFAS)，尽管这并非本次预测的重点。2023年，五个欧盟国家的化学品主管部门发布了限制使用此类化学品的提案，呼吁最终予以禁用。该提案预计将于2025/2026年生效。³¹针对欧盟公布的提案和美国现有或拟议的各项法规，国际半导体产业协会SEMI正在考虑减少PFAS的使用并寻找替代品。³²

制造转型

如今的芯片制造工厂就像一片森林，有着树干、树叶和庞大的根系：除了地面上的所有机器和洁净室外，头顶上还有由管道和导管组成的树冠层，地下（辅道生产层sub fab）还有一套更为复杂的泵、减排系统、洗涤器和变压器。这一生态系统有许多难以实时访问或监控的部分，通过建模、在各处添加连接传感器以及持续监控能源、水和工艺气体的使用情况，可实现效率提高。支持技术包括数字孪生、生成式人工智能和5G专用网络。能进行泄漏检测，不使用时系统可切换为待机或关闭状态。改造已有十年历史的芯片厂可能需要花费数亿美元，但在可持续发展、降本增效方面所取得的收益，无论对企业还是对地球来说都是值得的。

总体而言，这一理念是六维建筑信息模型 (6D BIM) 概念的组成部分，其中包含六个维度，特别是建筑的性能和可持续性。BIM是创建和管理建筑信息的过程，通过加入这一补充维度，虚拟模型不仅可以描述建筑的物理、时间和成本相关方面，还可描述其对环境和社会的影响。因此，6D BIM可作为评估建筑对其周围环境和社区影响以及识别改进机会的宝贵资源。³³

毛利与净利：芯片比你认为的更环保

到2030年，制造价值万亿美元芯片将在能源、水和温室气体方面对环境产生影响。该行业正在努力尽可能降低这种影响，但值得注意的是，芯片有助于实现可持续性收益。借助于芯片支持的视频会议技术，可避免公路和航空旅行；计算机是药物发现和设计的标准工具；³⁴超大规模企业投资于更多可再生能源，为数据中心的芯片供电，³⁵粮食种植也可实现可持续发展（参见农业科技预测）。有些人可能认为，芯片带来的环境效益大于制造半导体带来的环境成本。

另一方面，也有人认为1) 芯片制造本身可能如此，但考虑到资源开采、测试与封装、分销、生命周期和使用周期结束等因素，情况就不那么有利了；³⁶2) 根据杰文斯悖论 (Jevons Paradox)（又称“能源回弹效应”），可能带来更糟糕的可持续发展结果——如果芯片制造效率提高，人们就会制造和使用更多芯片，从而可能带来更糟糕的总体结果。³⁷

小结

对于半导体公司而言，环保意识本身就是一种回报，提高可持续性大有裨益，5C框架：即资本（投资者）、合规（监管机构）、成员（如员工）、社区和创造力（创新）对半导体公司提高可持续性的要求也日益提高。但是，提高可持续性通常也有利于降低成本，有助于争夺半导体行业人才，并能降低半导体供应链的脆弱性。

目前，环境、社会及管治 (ESG) 专项基金规模达8万亿美元，预计到2030年将高达30万亿美元。³⁸即使在专项基金之外，资产管理公司在构建投资组合时也越来越多地使用ESG筛选工具，其中也包括芯片制造商。另一个挑战来自监管机构：目前，大多数上市公司披露范围1和范围2排放（直接和间接能源使用），但不披露范围3排放（上下游供应链）。欧洲和美国的监管机构都有可能要求披露范围3排放。众所周知，在出现大面积芯片短缺之后，几乎每个行业的供应链中都包含芯片，客户会要求芯片制造商具备最佳可持续发展的企业形象。

能源、气体和水（通常在较小程度上）成本较高，且在不断上涨。降低这些投入成本会对企业净利润产生积极影响。同样，半导体公司致力于在亚洲等传统据点以及越来越多在美国和欧洲新建绿地工厂。³⁹全球人才争夺战加剧：半导体行业正在与其他多个行业争夺稀缺的技术型人才，且应保持良好的环保记录。⁴⁰员工（尤其是年轻员工），更愿意就职于保持最佳可持续发展记录的公司：2023年德勤对Z世代和千禧一代的调研发现，“六分之一的受访者已经因为气候问题更换了工作或行业，另有四分之一的受访者计划在未来这样做。”⁴¹

最后，减少对能源和水的依赖可大幅扩大芯片厂的选址范围。近期，干旱影响了多个地区的芯片制造，正如一条新闻标题写道：“没有水，就没有芯片。”⁴²同样，亚洲和美国的芯片制造商也受到了因气候变化导致的停电影响，而芯片工厂严重依赖于不间断的电力供应。⁴³鉴于对原材料依赖程度较高（参见原材料和供应链预测）以及可能出现运输中断情况，投资于半导体的可持续发展可为供应链韧性带来巨大益处。

作者

Duncan Stewart
Canada

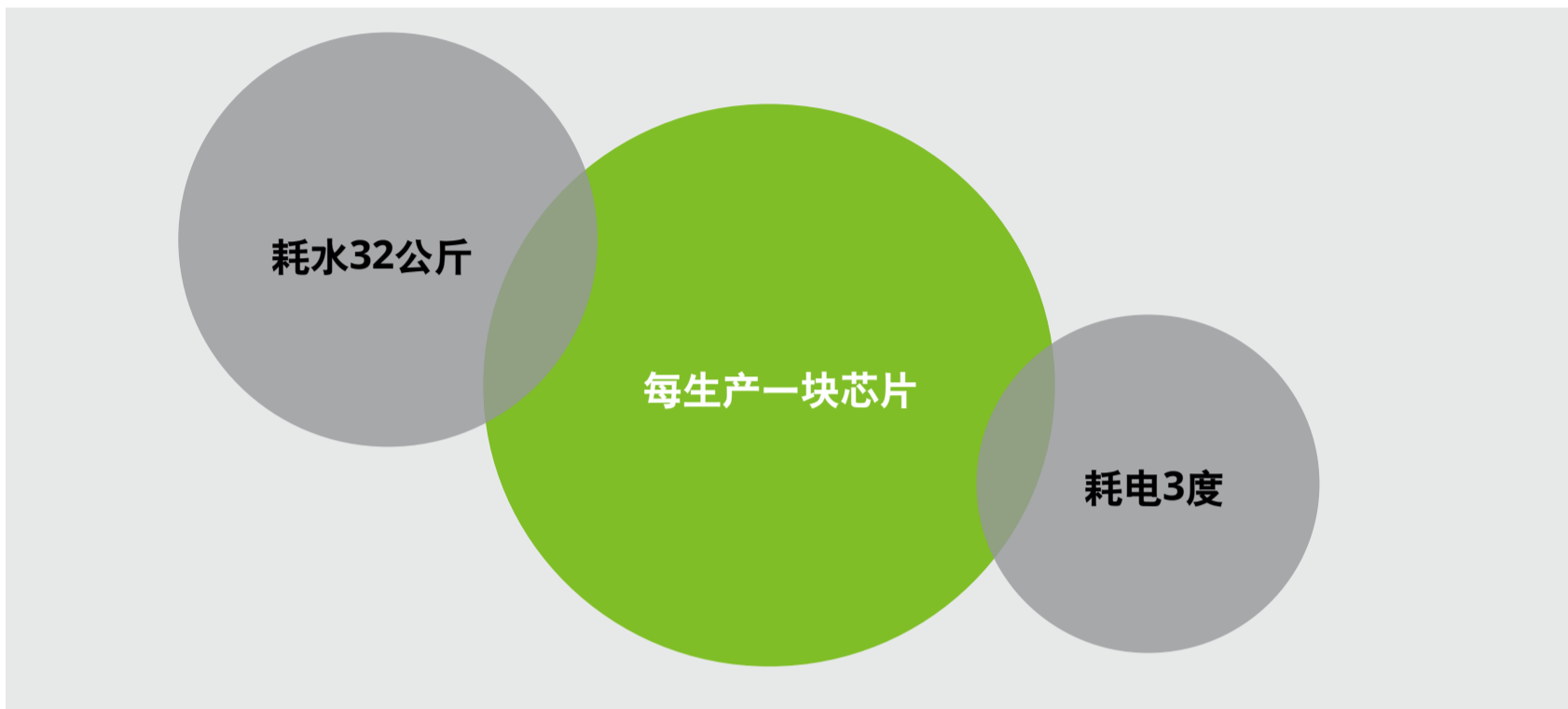
Dr. Bobby Mitra
United States

Karthik Ramachandran
India

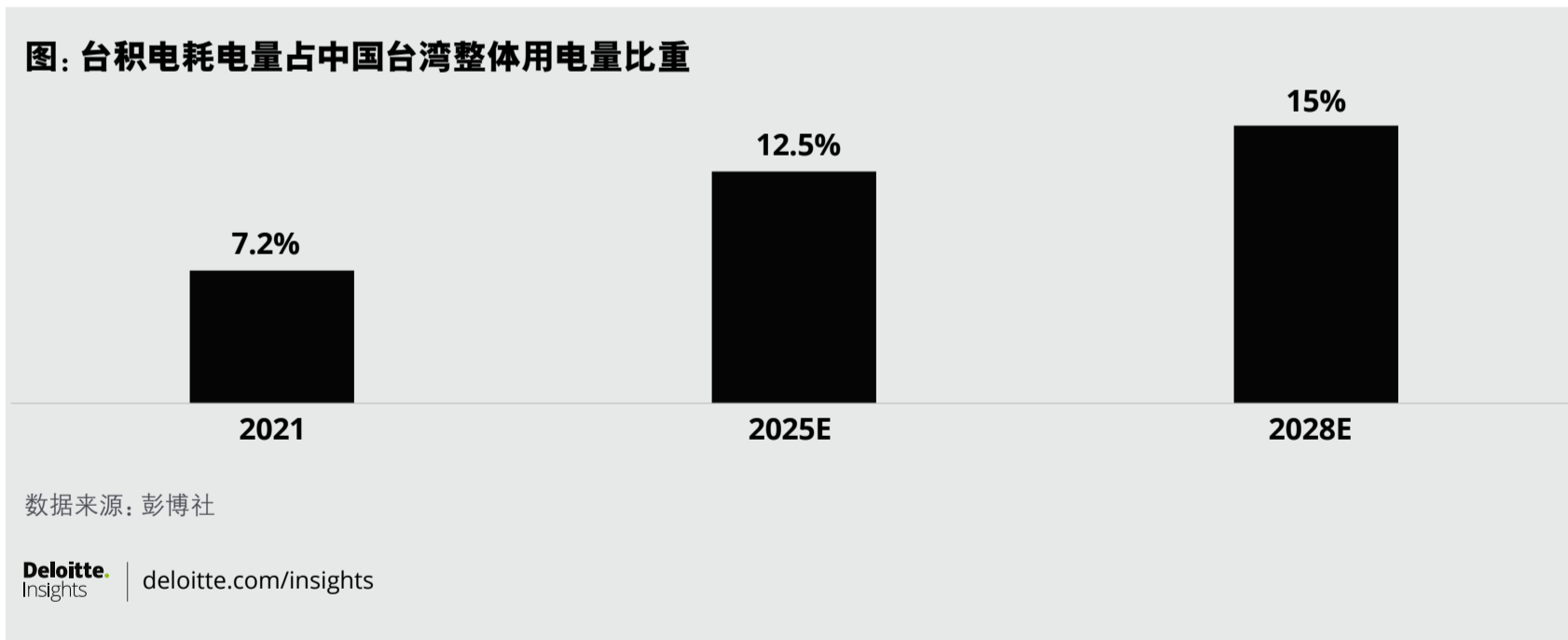
Christie Simons
United States

中国半导体企业将进一步深化绿色可持续发展

半导体产品的整个生产制造过程中需要消耗大量能源。在芯片的制造过程中，需要使用纯净水对芯片上的杂质进行冲洗，这会消耗大量的水资源。此外，生产一颗芯片需要经历许多工序，这涉及使用大量的半导体设备，并且环境须保持恒定的温度、湿度和空气洁净度等条件，这些都需要电力支持。随着芯片的产量增加和半导体工艺的进步，所需的电力也会增加，同时水资源的消耗也随之增加。据估计，生产一个2克重的计算机芯片，需要32公斤水资源，耗电3度。生产一片12英寸晶圆的耗水量约为4~5立方米，耗电1420度。



例如，台积电消耗了中国台湾超过7%的电力，用电量超过了拥有270多万人口的台北市。随着规模的不断扩张，半导体产业能源消耗和碳排放量持续上升。预计到2025年，仅台积电一家公司就将占中国台湾整体能源消耗的12.5%。到2028年，能达到15%。



随着我国半导体需求的提升，半导体产业规模的扩张，半导体制造业废气废水等大量污染排放和高耗能也愈加受到政府与企业的关注。某些地方政府正逐步完善相关政策，例如，江苏省为了规范半导体行业污染物排放，先后制定了半导体行业污染物排放标准，且经过多次修订及完善，针对大气污染物（如：颗粒物、氨、硫酸雾等）排放设置了排放浓度限值，以及水污染物（如：氟化物、硫化物等）也设置了排放限值。预期中国半导体可持续发展将呈现以下趋势：

1.更多半导体企业从“被动”合规转变为“主动”合规

此前企业通常根据政策要求，在环境评估报告中纳入碳排放信息，或者定期在ESG以及国家环境信息平台上进行披露，以符合政策要求，处于“被动”合规。然而，随着“双碳”政策的提出，越来越多的企业会主动采取行动，主动披露排放信息，积极探索可持续发展路径，趋向“主动”合规。

2.进一步深化绿色生产流程

半导体企业将进一步深化对半导体生产过程的绿色化，减少碳足迹，减少对环境有害的排放。越来越多半导体企业将会在整个半导体生产流程中探索绿色转型，着重于生产工艺优化、效能提升、排放治理以及绿色能源使用等方面。

3.碳管理将成为半导体企业社会责任担当的体现，助力企业实现长期价值

中国半导体企业越来越意识到践行绿色低碳是整个半导体行业企业的社会责任，碳管理能力将成为企业社会责任担当的体现。提升碳管理能力有助于企业满足政府、投资者、社会大众、客户和供应商等多个利益相关方对环境保护日益严格的期望和要求，能够提升利益相关方对可持续发展的半导体企业的认同，有利于为企业创造更多的发展机会，从而实现长期的价值增长。

半导体作为高科技发展的核心基础领域，半导体企业应发扬自身优势，遵循可持续发展框架，积极采取有效的可持续发展措施，才能推动构建可持续未来。半导体企业可通过以下措施实现可持续发展：



- **开发节能芯片和设备等产品：**半导体企业可以通过开发低功耗的芯片和设备，减少客户在使用过程中的能源消耗和碳排放。例如，以氮化镓、碳化硅为代表的宽禁带半导体具有耐高温、耐高压、高频率、大功率等优势，相比硅器件可降低50%以上的能量损失。
- **优化半导体生产工艺，升级相关系统和设备：**半导体制造过程中会产生大量的废气、废水和废料，因此，半导体企业应该通过优化生产工艺和使用节能设备和工具，减少能源消耗和废弃物产生，从而降低碳排放。例如，成都一半导体工厂通过升级冰机和冷却塔管理系统和控制设备，年节电量275万度，节水约4,000立方米，减少碳排放2,100多吨。
- **使用再生材料：**半导体企业可以采用生物基材料或再生材料来减少对化石燃料的依赖，从而减少生产过程中的碳排放。例如，使用生物基塑料可以减少对石油的需求，从而减少碳排放。
- **半导体制造中推进绿色能源的使用：**半导体是高能耗行业，企业可以尽量使用清洁能源，如太阳能和风能等可再生能源，减少对化石燃料的依赖，从而降低碳排放。
- **定期核查半导体厂区温室气体排放：**半导体企业可以定期核算厂区的温室气体排放量，掌握企业温室企业排放情况，建立能源管理制度，实施减排措施。同时，亦可采用碳捕捉和储存技术来减少碳排放。
- **污染废气治理与监测：**半导体生产过程中可采用多重废气处理方式，例如，在机台端和中央处理端实施两级废气处理。并定期利用第三方机构对排放的废气进行检测，以验证排放达标。
- **废弃物管理与回收：**将半导体制造产生的废弃物以酸性、碱性、毒性、氧化性、自燃性和易燃性等类别进行分类，并定期运送给具有相关废弃物处理资质的厂商处理。此外，积极探索部分废弃材料的回收利用可能性，确保可回收利用的材料进入回收利用循环。例如中国台湾一大型半导体厂商已实现86%废水回收率，平均每升水可重复利用3-4次。

半导体企业可以通过以上措施来节约能源、减少污染物排放，既是企业自身的环境保护社会责任，同时，也会带来技术创新和合作推进的机会，实现行业可持续发展。

作者

钟昀泰
中国

尾注

1. Dan Hamling et al, "[Five fixes for the semiconductor chip shortage](#)," Deloitte, December 6, 2021.
2. [WSTS Semiconductor Market Forecast Spring 2023](#), May 2023.
3. Vyra Wu, "[Global semiconductor market to exceed US\\$1 trillion in 2030, at CAGR of 7%, says DIGITIMES Research](#)," Digitimes Asia, January 10, 2023.
4. Marie Garcia Bardon, Bertrand Parvais, "[The environmental footprint of logic CMOS technologies](#)," EE Times, December 14, 2020.
5. Sarah Barry James, Stefan Modrich, Sydney Price, "[Path to net-zero: US chipmakers balance growth vs. going green](#)," S&P Global Market Intelligence, June 13, 2022.
6. Ibid.
7. Cheng Ting-Fang and Katherine Creel, "[TSMC moves up 100% green energy goal by 10 years](#)," Nikkei ASIA, September 15, 2023.
8. 2021年, 半导体行业的全球范围1和范围2排放量估计为76.5公吨二氧化碳当量。2021年的全球排放量为37.9吉吨二氧化碳当量, 因此半导体行业的排放量占全球排放量的0.2%。Maxime Pelcat, "[GHG emissions of semiconductor manufacturing in 2021](#)," University of Rennes, INSA Rennes, 2023年6月1日。
9. Christel Galbrun-Noel, "[How to improve power reliability for semiconductor fabs](#)," Schneider Electric blog, November 15, 2021.
10. 492 plants based on [Wikipedia's consolidated list of semiconductor fabrication plants](#), accessed September 14, 2023.
11. SemiMedia, "[41 new fabs to be added globally from 2022 to 2025](#)," November 4, 2022.
12. Bardon and Parvais, op. cit.
13. 德勤对多家半导体公司可持续发展报告的分析。
14. 英特尔 (Intel) , [2022-23 Corporate Responsibility Report](#), 访问于2023年9月14日。
15. 根据选定半导体公司公开发布的企业可持续发展报告中的数据进行分析。
16. 参见图2的资料来源和方法注释。

17. Chris Jones, Shannon Davis, "[Water supply challenges for the semiconductor industry](#)," Semiconductor Digest, October 24, 2022.
18. Intel press release, "[Intel achieves net positive water in 3 countries](#)," July 13, 2022.
19. Intel press release, "[Intel achieves net positive water in 3 countries](#)," July 13, 2022.
20. 同上。
21. 同上。
22. US Environmental Protection Agency, "[Semiconductor industry, F-Gas partnership programs](#)," accessed September 14, 2023.
23. Generon公司官网, "[Using nitrogen gas in the semiconductor manufacturing process](#)," 访问于2023年9月14日。
24. Mike Czerniak, "[The time is now: Sustainable semiconductor manufacturing](#)," Semiconductor Digest (November 2021), pp: 16-19.
25. Op. cit. EPA article
26. 同上。
27. Op. cit. Edwards
28. 三星正在开发G₁ (或G1), 作为低GWP的替代气体之一, 在某些产品中取代PFC气体。参见: [Samsung Electronics Sustainability Report 2023](#), 访问于2023年9月14日。
29. Op. cit. IMEC
30. Chris Bailey, "[Recovery and recycling of process gases: What are the options?](#)", Semiconductor Digest, February, 2020.
31. Eurofins, "[PFAS restriction proposal: The largest substances ban project ever in Europe](#)", accessed September 16, 2023.
32. SEMI.org, "[PFAS Explainer: The Semiconductor Industry Responds](#)", Accessed September 16, 2023
33. The BIM Engineers blog, "[From 3D BIM to 7D BIM](#)," June 8, 2023.
34. Wikipedia, "[Drug design](#)", accessed October 25, 2023.
35. Rick Johnston, "[How data centers can use renewable energy to increase sustainability and reduce costs](#)", Device 42, April 5, 2023.
36. 对德勤半导体可持续发展专业人员进行的访谈, 2023年7月和8月。

37. Jaume Freire González, [“The Jevons Paradox and Rebound Effect: Are we implementing the right energy and climate change policies?”](#) The OECD Forum Network, September 22, 2022.
 38. Broadridge Distribution Insight, [“ESG and sustainable investment outlook: \\$30 trillion by 2030 on the way to net zero,”](#) 2021.
 39. Christie Simons and Brandon Kulik, [“2023 Semiconductor Outlook”](#), Deloitte, January 23, 2023.
 40. Karen Weisz, Christie Simons, Brandon Kulik, Duncan Stewart, and Teresa Lewis, [“The global semiconductor talent shortage”](#), Deloitte, November 8, 2022, page 7.
 41. 德勤, [“2023年Z世代与千禧一代调研报告,”](#) 2023年。
 42. Emanuela Barbiroglio, [“No water no microchips: What Is happening In Taiwan?”](#) Forbes, May 31, 2021.
 43. 根据来自EDN (2001年)、Silicon Expert (2021年) 和CNBC (2022年) 的公开信息进行的分析表明, 不同时间点停电和断电对美国和亚洲的工厂运营和芯片制造产生何种影响。
-

致谢

The authors would like to thank **Jan Nicholas, Dan Hamling, Steve Watkins, Iain Nicklin, Nicholas Wyver, NeginaRood, and Sathiya S.**

Cover image by: **Manya Kuzemchenko**