



视觉中国供图

碳化硅，第三代半导体时代的中国机会

聚焦新材料④

◎本报记者 王海滨

今年发布的“十四五”规划和2035年远景目标纲要提出，我国将加速推动以碳化硅、氮化

镓为代表的第三代半导体新材料新技术产业化进程，催生一批高速成长的新材料企业。

科技日报记者7月18日对业内专家进行采访时发现，他们对我国第三代半导体的发展持积极态度，并认为第三代半导体材料或许可为我们摆脱集成电路被动局面、实现芯片技术追赶和超车提供良机。

碳化硅性能优势显著、用途广泛

半导体产业发展至今经历了3个阶段，第一代半导体材料以硅为代表；第二代半导体材料砷化镓也已经广泛应用；而以碳化硅为代表的第三代半导体材料，相较前两代产品性能优势显著。

碳化硅又称碳化硅石，是在大自然中也存在的罕见矿物，工业上以石英砂、石油焦(或煤焦)、木屑为原料通过电阻炉高温冶炼而成。

山西烁科晶体有限公司(以下简称山西烁科)生产部经理、高级工程师毛开礼介绍，碳化硅有非常独特的性能优势。它拥有宽禁带，使得单个器件可以承载上万伏电压；热导率高，工作可靠性强；载流子迁移率高、工作频率大，省电能。这些优势让碳化硅材料的性能呈现指数级提升，用途也更为广泛。

碳化硅是卫星通信、高压输电、轨道交通、电动汽车、通信基站等重要领域的核心材料，尤其是在航天、国防等领域有着不可替代的作用。

据中金企信国际咨询发布，目前我国在5G

通信、电动汽车等新兴产业的技术水平、产业化规模等方面都处于国际优势地位，将促进我国上游半导体行业的持续发展，进一步提高国内半导体企业在国际市场的影响力，尤其对碳化硅器件将产生巨大的需求。

毛开礼告诉记者，N型碳化硅晶片可用于制造电动汽车等领域。据介绍，目前的电动汽车续航里程能力还是一个问题。如果用上碳化硅晶片的话，就能在电池不变的情况下，使汽车的续航里程增加10%左右。虽然碳化硅在电动汽车上的应用才刚刚起步，但每生产一辆电动汽车，至少要消耗一片碳化硅，按照我国电动汽车保有量每年增长70%的速度来看，碳化硅仅在电动汽车领域就将带动一个千亿级的产业集群。

山西烁科总经理李斌告诉记者，现在碳化硅产业正处于高速发展时期，大力发展碳化硅产业，可引领带动原材料与设备两个千亿级产业，助力我国加快向高端材料、高端设备制造业转型发展的步伐。

单晶生长工艺正追赶世界先进水平

今年1月，湖南省首个第三代半导体产业园及国内首条碳化硅研发生产全产业链产线封顶。据介绍，该项目主要包含碳化硅长晶、衬底、外延、芯片、器件封装等厂房及相关配套设施建设，项目全面建成投产后，将形成碳化硅研发和生产全产业链两条生产线，生产可广泛用于新能源汽车、高铁机车、航空航天和无线通信等领域的高质量、低成本、高稳定性碳化硅衬底及各类器件。全部建

成后预计可实现年产值120亿元以上，并可带动上下游配套产业产值预计超1000亿元。

碳化硅单晶的制备一直是全球性难题，而高稳定性的晶体生长工艺则是其中最核心的技术。之前，这项技术只掌握在美国人手里，且长期对我国进行技术封锁。我国半导体材料长期依赖进口，由此带来的问题就是半导体材料价格昂贵、渠道不稳，随时都可能面对断供的风险，而

融合，最终会影响材料的机械性能。

2019年，唐睿康团队发布了一项“无机离子聚合”成果，实现了实验室厘米尺寸的碳酸钙晶体材料的快速制备，并且可以按照模具形状进行制备。

在该项研究过程中，团队成员注意到——无定形碳酸钙颗粒在压制过程中，颗粒边界渐渐消失，最后完全融为一体。

越来越多的研究发现，生物体可以通过无定形前驱体颗粒融合而产生具有连续结构的矿物骨骼。例如，正是深海高压环境和无定形矿物，为深海龙鱼具有连续结构牙齿的形成提供了条件。

本次研究中，论文第一作者、浙江大学化学系博士生慕昭与孔康任通过实验发现，如果水分子能保持在一个合适的量，就能在碳酸钙内部形成动态水通道，促进碳酸根离子与钙离子的重新“站队”，加速混合，最终实现无定形颗粒的融合。

实验人员通过普通加热的方式，实现对水的调控。当一个碳酸钙分子对应0.2—1.1个水分子的时候，再施加0.6—3.0GPa的压力，就能实现无定形碳酸钙颗粒的融合。团队由此成功构建了具有连续结构的碳酸钙块体材料。

“2019年那项研究是从零开始合成碳酸钙晶体大块材料。本次研究是如何把已有的碳

且产品的质量也难以得到有效保证。

李斌介绍，碳化硅晶体的生长条件十分严苛，不仅需要经历高温还需要压力精确控制的生长环境，同时这些晶体的生长速度很缓慢，生长质量也不易控制。在生长的过程中即便只出现一丝肉眼无法察觉的管洞，也可能影响晶体的生长质量。碳化硅晶体的生长过程就如同“蒙眼绣花”一样，因为温度太高，难以进行人工干预，所以晶体的生长过程十分容易遭到扰动，而如何在苛刻的生长条件下稳定生长环境，恰恰是晶体生长最核心的技术。要想生产出高质量的碳化硅

市场潜力还远未被全部挖掘

碳化硅由于化学性能稳定、导热系数高、热膨胀系数小、耐磨性能好，除作磨料用外，还拥有很多用途，例如：以特殊工艺把碳化硅粉末涂布于水轮机叶轮或汽缸体的内壁，可提高其耐磨性而延长使用寿命1—2倍；用以制成的高级耐火材料，耐热震、体积小、重量轻而强度高，节能效果好；低品级碳化硅(含碳化硅约85%)是极好的脱氧剂，用它可加快炼钢速度，并便于控制化学成分，提高钢的质量；此外，碳化硅还大量用于制作电热元件硅碳棒。

李斌分析认为，目前碳化硅产业原材料占企业成本的65%，到2025年，仅山西烁科一家企业的原材料需求就可达6.5亿元左右。

今年以来，有10多个碳化硅项目在全国各地开工或取得积极进展，可谓遍地开花；露笑科技在安徽合肥投资100亿元，发展碳化硅等第三

代半导体材料的研发及产业化项目，还投资7亿元在浙江绍兴建成了碳化硅衬底片项目；华大半导体在浙江宁波投资10.5亿元的项目，计划年产8万片4—6英寸碳化硅衬底及外延片、碳化硅氮化镓外延片；中科院在山东青岛建成集成电路产业园，有望打破碳化硅衬底片依赖进口的局面；ROHM-臻驱科技在上海联合成立的实验室，致力于开发、测试及推广以碳化硅为基础材料的功率半导体技术……

毛开礼表示，虽然碳化硅可被应用于新能源汽车、高铁机车、航空航天和无线通信等多个领域，可谓“万物皆可碳化硅”，但碳化硅的市场潜力还远未被挖掘，如果从产业链中游来看，我国第三代半导体器件市场有着巨大的增长空间，或能成为倒逼上游材料发展的一大动力。

山西烁科经过反复钻研攻关，最终完全掌握了这项技术，打破了国外垄断，实现了高纯度碳化硅单晶的商业化量产。现在，山西烁科碳化硅半导体材料产能国内第一，市场占有率超过50%。

山西烁科粉料部经理马康夫介绍，碳化硅晶片之所以如此珍贵，除了它应用范围广泛外，还因为其生产技术非常不易掌握。一个直径4英寸的晶片一次可以做出1000个芯片，而直径6英寸的晶片一次则可以做成3000个芯片。但从4英寸到6英寸，晶体的生长是最难破解的关键技术。

新型纳米薄片 可提高二氧化碳的光催化转化

科技日报讯(记者赵汉斌)记者7月19日从云南大学材料与能源学院了解到，该院云南省先进能源材料国际联合研究中心郭洪教授团队近期在新能源存储材料领域取得突破性进展，他们研发出一种纳米薄片，可通过光催化将二氧化碳转化为碳氢化合物。国际著名期刊《化工学报》发表了相关研究成果。

近年来，化石燃料的过度使用已经引起了全球的能源危机及环境问题，极大地阻碍了人类社会的可持续发展。

“过量二氧化碳排放，导致严重的环境和能源问题。通过光催化作用转化二氧化碳，是目前公认的解决能源短缺和过量二氧化碳排放问题的最有效策略之一。”论文通讯作者郭洪教授介绍。但是，由于碳基裂解能高，光催化转化二氧化碳也远没有在实际应用中得到普及。此前的研究表明，二维纳米材料因其特殊的形态结构，具有还原性。

为促进实现碳达峰、碳中和的可持续发展目标，在课题组前期研究基础上，郭洪结合材料中空结构形貌构筑双金属位点和富硫空位的优点，设计了一种超薄纳米片异质结构，这种结构具有更好的可见光光催化活性，显著提高了光催化还原二氧化碳生成碳氢化合物的选择性和活性。

这种纳米薄片，中空结构的引入产生的双金属位点，使催化剂具备了电化学还原二氧化碳反应中对产物碳氢化合物较高的选择性；而石墨相氮化碳的中空球壳结构，则可以通过增大可见光在腔体内的反射次数，提高可见光的利用率，从而对催化剂的性能进行优化。并且通过原位红外与密度泛函理论计算，明确了电化学还原二氧化碳反应中对碳氢化合物有显著选择性的机制。

这项研究，为开发低成本与持久循环稳定性、高活性和选择性的二氧化碳催化转化提供了一种新策略。



视觉中国供图

纳米材料环境生物效应 精准预测有了新支撑

◎本报记者 陈曦 通讯员 付坤 于福波

当前，纳米材料在电子机械、医疗化工、能源环境等诸多领域的研究、应用迅速发展，但纳米材料的环境效应预测存在高内涵数据库缺乏、环境转化情景遗漏、模型普适性弱等问题，严重制约了国家对危害性纳米材料的风险防控。

科技日报记者7月18日从南开大学获悉，该校环境科学与工程学院胡献刚教授团队在拓展机器学习算法预测纳米材料的生物效应，以及通过增强机器学习的可解释性，从而探索纳米材料生物效应的机理方面取得了突破，为上述问题的解决提供了新的研究思路。相关论文发表在《科学进展》上。

据介绍，为有效控制和削减环境污染物，必须首先了解污染物的产生源头、分布特征、转化规律以及毒性效应，进而对污染进行治理或修复，这就需要对化学品进行环境效应预测。这是国家对危险化学品进行风险防控的重要手段，也是当前毒理学研究的重要方向。在2005年发生的松花江污染事件、大气雾霾成因等重大环境问题上，环境生物效应预测发挥了不可替代的作用。

目前，在对纳米材料的环境生物效应预测中，机器学习模型已广泛应用，但是受限于机器学习的可解释性，利用机器学习模型揭示复杂纳米毒理的机制仍具有很大的难度。

胡献刚教授团队在前期工作基础上创建了纳米材料—生物效应数据库，构建了纳米材料—生物效应回归模型，并提出了一个基于树的随机森林特征重要性和特征网络交互分析框架(TBRFA)，该框架通过多指标重要性分析方法，克服了小型数据集导致的特征重要性分析偏差，并利用随机森林的工作机制建立了特征交互网络，揭示了潜在的影响纳米材料生物效应的交互因素。

TBRFA包含重要性分析与特征交互网络分析。TBRFA重要性分析采用多个重要性指标，以平衡传统的单一指标带来的偏见，并识别出暴露恢复时间、材料比表面积以及材料尺寸是影响纳米材料诱导生物效应的重要因素。TBRFA特征交互网络分析通过解析随机森林的树结构，计算出两两特征之间的交互作用系数，并识别出材料的比表面积与表面电荷、比表面积与长度、长度与直径之间在诱导生物效应过程中如何相互制约与影响。

胡献刚表示，这项研究对研发环境友好型纳米材料具有一定的指导作用，将为纳米材料的生态环境安全性评估提供新的策略；该机器学习算法除了适用于纳米材料环境效应分析，也可用于重金属、有机物污染等环境生物效应的预测、评估。

水和压力来“调解” 无机块体材料不再“面合心不合”

◎洪恒飞 吴雅兰 本报记者 江耘

在很多无机物的修补工作中，例如文物保护、牙齿修复等，普遍应用有机修补缺材料。相比弹性大、可塑性强的有机材料，碳酸钙等无机化合物硬且脆，制备成块体材料难度较大。

科技日报记者7月19日从浙江大学获悉，该校化学系唐睿康教授与刘昭明研究员合作研究发现，可以通过调控结构水含量和外部压力，将无定形碳酸钙颗粒融合为具有连续结构的透明块体材料，这为制备无机块体材料提供了重要的制备策略。相关研究论文刊登于国际顶级期刊《科学》上。

参照生物矿化“小石头”成功合体

“用有机物修补文物、牙齿等，即使看上去和原有的无机化合物并无差别，但由于内在相溶性不好，还是会出现裂缝、易损等现象。”唐睿康介绍，要实现“神形兼备”，根本途径是用无机材料修补无机物。

无机块体材料通常是由无机颗粒烧结而成。比如陶瓷是在1000摄氏度左右的高温下烧制而成的，但颗粒之间仍然有空隙，内部结构并未

研究人员通过普通加热的方式，实现对水的调控。当一个碳酸钙分子对应0.2—1.1个水分子的时候，再施加0.6—3.0GPa的压力，就能实现无定形碳酸钙颗粒的融合，把已有的碳酸钙粉末材料变成大块材料，好比把小石头融合成一块大石头。

巧用以柔克刚 探索新制备策略

为了验证结果，团队把金纳米颗粒标记在碳

酸钙粉末材料变成大块材料，好比把小石头融合成一块大石头，二者殊途同归。”唐睿康表示。

研究团队进一步实验发现，此类融合现象适用于多种无机离子化合物。“除了水分子以外，其他离子也可以作为添加剂加进去，添加剂会影响碳酸钙的流动性和融合性。”孔康任说。

唐睿康表示，这项研究展示了无定形相在材料加工中的优势，赋予人工块体材料新的制备模式，有望应用在生物、医学、材料等领域。

论文评审专家认为：“这项新颖且富创新性的研究对设计新型陶瓷及陶瓷/有机复合材料具有潜在的引领意义，对提升材料力学性能有重要价值，尤其是针对热敏感材料。”