

第三代半导体的自画像

陆敏^{1,2,†}

(1 《化合物半导体》编辑部 香港)

(2 常州臻晶半导体有限公司 常州 213000)

2021-11-12收到

† email: minl@actintl.com.hk

DOI: 10.7693/wl20220608

1 引言

特斯拉市值破万亿美金, Wolf-speed 在纽交所上市、Navitas 在纳斯达克上市、山东天岳科创板 IPO 成功过会, 这些都是与第三代半导体直接相关的公司的讯息, 可以表明第三代半导体备受资本青睐和产业关注。因关联华为、5G、电动汽车、新基建、中美贸易战等焦点, 第三代半导体成为热搜词而被各类媒体所报道。在资本市场, 第三代半导体也异常活跃, 很多所谓第三代半导体概念股纷纷成为涨停热门股, 同时各类第三代半导体新建项目在各地风起云涌。第三代半导体为何如此备受厚爱呢?

2 天生我材必有用

将半导体材料划分为第一、第二和第三代半导体是我国的通俗叫法。第一代半导体指以硅、锗为代表的元素半导体材料, 第二代半导体指以砷化镓、磷化铟为代表的化合物半导体材料, 第三代半导体的科学名称是宽禁带半导体, 因其带隙宽而得名, 一般大于 2.3 eV。主要有碳化硅、氮化物、氧化物和金刚石等, 其中以碳化硅和氮化镓最为热门, 因为其工艺最成熟, 并在产业化上推进最快。这类材料一般具有四大特性: 大带隙、大载流子漂移速率、大热导率和大击穿场强; 做成的器件对应有四高性能: 高功率、高频率、高温和高电压; 制造

的装备系统对应有四小优点: 小能耗、小体积、小重量和小成本(暂时尚未实现)。碳化硅材料很硬, 莫氏硬度仅次于金刚石, 但很脆, 非常难加工, 而且容易碎片。自然界中的天然材料, 一般越硬就越脆, 这是自然科学规律。刚柔相济, 柔中带刚的材料当然是更好的, 但这必须经过人工设计。人工材料的制备, 需要科学家精心设计, 现今的陶瓷领域已经有很多“刚柔相济”的材料。另外, 有很多材料性能很好但很贵, 绝缘性能好但导热性能差等等, 都是个性鲜明, 优缺点共存, 因此没有完美的材料, 只有完美的应用, 就是“天生我材必有用”, 必须扬长避短, 为它找到最合适的应用场景。

第三代半导体主要应用在光电子和功率电子领域(图 1), 光电子涉

及 LED、LD 及光探测器, 目前热门赛道是 Micro-LED 及深紫外 LED, 主要是氮化镓等氮化物的应用。功率电子包括电力电子及微波射频, 明星器件是碳化硅 SBD 及 MOSFET、GaN HEMT 等, 主要是碳化硅和氮化镓的竞争及合作, 竞争是在电力电子领域, 碳化硅适合中高压, 氮化镓适合中低压, 故在中压范围(650—1200 V)是一争高下之地。但是在微波射频领域, 两者又是珠联璧合、完美合作的典范, 半绝缘碳化硅衬底上外延生长氮化镓, 形成 SiC 基 GaN-HEMT, 它现今在 5G 基站功率放大器中占据了半壁江山, 据预测, 它的地位还要逐步提升, 将来可能独占 5G 基站。

就材料本身而言, 面对应用和市场还有很多科学和技术问题急需解决, 对于碳化硅, 迫切需要研究

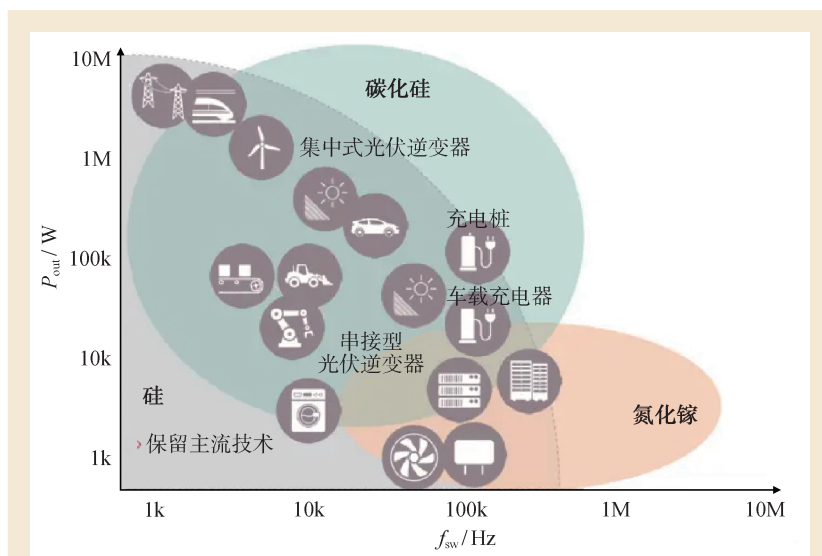


图1 第三代半导体的物性及其应用领域

大尺寸(主要是6—8英寸)4H-SiC 晶体生长与电学特性控制技术,有效提升电学性质的一致性、均匀性和可靠性;研究4H-SiC单晶生长过程的热力学和动力学特性及成核生长机理,研究单晶生长过程中杂质、晶型和缺陷控制技术;针对大尺寸4H-SiC衬底加工工艺和表面质量、面型参数等关键技术问题,研究高效、低损耗的加工技术和大尺寸4H-SiC单晶衬底表面粗糙度控制技术。对于氮化镓,需要开创GaN单晶衬底材料的新生长技术探索,研究GaN液相生长中的成核、传质运输、结晶生长机制;研究GaN中背景杂质控制、应力控制等关键技术;研究GaN中位错的产生、湮灭、演化机制;研究GaN氨热法生长中的杂质控制与光学、电学性能调控技术;研究GaN助熔剂生长中的形核控制与大尺寸生长技术等。另一方面,也要继续推进大尺寸、低成本4H-SiC及六方GaN单晶的产业化及市场渗透。

第三代半导体的器件和装置小巧且性能高,应用很广,当前主要的问题是成本很高、价格很贵。当然,随着技术的进步和市场体量的增加,成本价格问题必然会得到很好的解决。

3 没有希望,就没有未来

受到电动汽车等产业拉动,2012—2019年间中国共有26个碳化硅产业化投资项目(以后简称项目),投资金额超过120亿元。2020年国内碳化硅项目风起云涌,全年出现了32个碳化硅项目,合计投资超过560亿元。2021年国内又新增了12个碳化硅项目,合计金额超过1200亿元。如此多的投资,争抢如此高端的市场,证明了“希望”。因为没有希望,就没有未来!众所周知,民用功率器件应用主要分3个层次:消费级、工业级和车规级。消费级对器件的可靠性要求最低,车规级最高,因此进入供应链名单的门槛最高,客户认证周期最长。而新能

源汽车应用恰恰是第三代半导体应用的最大蓝海市场(未来器件年市场估计最高可达500亿美元)。

特斯拉model 3车型主驱采用全碳化硅模块,开启了碳化硅大批量应用的“上车”之路。到目前为止,model 3全球销售近130万辆,连续3年荣登全球销售冠军,足以证明碳化硅上车,在技术、产业及市场等层面都没有问题。碳化硅模块的优越性能可以增加汽车5%—10%的续航里程,提速更快,充电更快,充电更省电,不过价格也更贵(与硅器件相比)。

碳化硅“上车”不是独占性的技术与应用,因为车上早就有了成熟的技术——老大哥“硅”,因此碳化硅“上车”必将引来“硅”的强势堵截,具体竞争的“领地”有主逆变器、车载充电器(OBC)及直流/直流转换器(图2)。当然,车上的其他芯片“领地”,如MCU、AI及CMOS图像传感器等信息、智能、控制芯片仍然是硅的“囊中之物”,无人能够匹敌。汽车产业是个传统行业,同时汽车安全关系到“生死攸关”的问题,因此供应链系统一直是很严谨和保守的,所以进入原始设备制造商(OEM)整车厂合格供应商目录是很困难的,与之相关联的技术、可靠性及供货能力门槛都很高,认证周期也很漫长。电动汽车脱胎于传统汽车行业,固然有其新兴业态的特征,但以上高门槛及长认证周期特性是一如既往的。

现今,除了特斯拉一款车型使用了碳化硅外,比亚迪在BYD汉,蔚来et7等车型上也采用了全碳化硅模块主逆变器,在车载充电器(OBC)上采用碳化硅技术的大概已有几十家车企。当前碳化硅在车用功率器件市场的渗透率尚处于低



位,但渗透率在快速提升。现在很多器件厂商,如 Wolfspeed、英飞凌、罗姆、安森美等都与 Tier1 或整车厂在展开各种合作,为碳化硅“上车”做着充分的紧锣密鼓的准备,毕竟这是一块每年500亿美金的未来“大蛋糕”,谁都不愿意错过。

基于以上原因,碳化硅的“上车”之路将是持久的,其市场的渗透速度取决于碳化硅价格的下降速度(核心是碳化硅衬底价格的下降)。估计到2030或2035年左右,碳化硅在车用功率器件市场的渗透率将达到50%,碳化硅首先会在价格不敏感的中高端车型上迅速铺开,当价格下降到一定空间之后再进入市场容量最大的中低端车市场。渗透周期长其实是好事,这样可以给行业更多的时间成长,同时给“后来者”更多的时间及机会来赶超“先行者”。这恰恰也是我们国产替代最好的机遇。

在这条车规赛道上,谁将最终胜出,主要比拼的有以下几点:

(1) 技术为王。王者技术不是最先进的技术,而是最好用的技术,低成本高性能的技术,如长晶技术及封装技术方面,尤其需要突破,一个关乎买得起的问题,另一个则关乎用得好的问题。PVT长晶技术的当务之急是解决物理气相基元快速运输机理及生长界面稳定机制问题,从而实现长晶速度、厚度及良率提升而降低成本;封装技术首要解决的是高温、高频、高密度封装技术难题,在成本控制范围内,大力提升碳化硅器件及模块的卓越性能。

(2) 管理为本。一旦进入OEM供应链,其需求量是相当可观的,必须有一个很大的可靠、稳定、安全的产能来支撑,没有一套严格、

先进、成熟的管理体系,恐怕难以胜任。

(3) 合作为魂。车规应用高门槛长周期,其核心是供需之间必须建立牢固可靠的信任关系,只有这样,才能有效地沟通,快速地解决问题,高效地技术迭代,为客户制造出安全可靠、性价比优异的电动汽车。故在一开始就应该建立衬底外延—器件模块—Tier1—OEM供应链合作联盟,展开深度的实际合作,逐步建立完备的互信关系。

碳化硅“上车”之路,路漫漫其修远兮,谁将赢到最后,我们拭目以待。

4 量力而行,循序渐进

受到快充及5G等产业拉动,2012—2019年,国内氮化镓项目共27个,合计投资超过810亿元,2020年有28个项目超过811亿元,2021年又新增了10个氮化镓项目,合计金额超过200亿元。如此多的项目投资,争抢的市场却非常小。说市场小是因为消费电子快充近两年产值都在1亿美元之内,将来最多10亿美元。5G主要用于基站,属于基础设施,建设期会有一定体量,运行期市场体量不大。并且由于5G应用场景较少,跟不上5G基站建设速度,因此建设有放缓的趋势,从2021年氮化镓项目投资情况也可以看见该态势。那这些年已经投资的氮化镓项目,它们将来的产品要应用到哪里呢?这是值得我们深思的。我们再看看国际龙头企业的典型投资案例,碳化硅龙头企业 Wolfspeed,是碳化硅材料领域名副其实的霸主,市场占有率在一半之多。近几年分批次逐步投入10亿美元扩产,扩产车规级8英寸材料,产能扩大到2017年的6倍左右,后

期再根据市场情况,进一步扩大产能5倍左右。与国外的依据市场发展规律的量力而行、循序渐进投资行为相比,我国可以算得上“大手笔”,我们的竞争优势何在?我们的赛道机会在何处?我们的窗口机会在哪里?都值得我们深思。

5 赛道决定成败

现今由于碳化硅材料质量远高于氮化镓,故碳化硅占据了近90%的第三代半导体电力电子器件市场。虽然第三代半导体器件性能优越,但在电力电子应用市场的总体渗透率还不到5%,这有诸如终端应用习惯、电路拓扑结构、开关器件驱动、封装技术等问题,但最核心的问题,或者说产业瓶颈各有不同。对碳化硅而言是衬底价格太高,虽然近几年随着市场需求的大幅提升及碳化硅衬底制造技术发展、良率的提升,碳化硅衬底价格逐年下降,但相对硅衬底还是很高,价格大概是相同尺寸硅衬底的60倍以上,器件成本中碳化硅衬底占比高达50%,从而导致碳化硅器件价格居高不下。对氮化镓而言是器件可靠性问题,硅基异质外延导致氮化镓中高缺陷密度,器件横向结构导致器件反向耐压及漏电流特性受限,因此价格虽然比较亲民,但是暂时主要在消费电子的快充领域展露身手。如何有效快速地降低碳化硅衬底成本,是实现第三代半导体电力电子产业高速腾飞的关键所在。

近年来,下游应用需求的猛增导致上游碳化硅材料供不应求,国际巨头提前锁定上游材料的货源;2021年8月,Cree公司与意法半导体(全球领先的半导体供应商)更新供货协议,扩大SiC晶圆供应量,

合作总额增至51.87亿人民币。Cree与安森美、英飞凌等器件企业的长期供货订单金额合计高达84亿。2020年1月, 罗姆供货意法半导体6寸碳化硅; 2019年8月GTAT与GlobalWafers、英飞凌签订长期供货协议; 2021年9月安森美收购GTAT以保障自己的材料供应链安全。对于国内企业, 更是造成进口高品质碳化硅材料一片难求的困境, 对于一个行业, 我们需要从产业链角度去整体分析其瓶颈所在, 也就是常说的“卡脖子”或产业痛点所在。只要在该瓶颈方向上努力攻关, 在该环节上重点突破, 就能疏通整个行业的血脉, 让全产业舒畅呼吸, 快速健康成长。痛点就是方向, 方向选对了, 其次就是选赛道, 即采用怎样的技术途径解决该痛点问题。如何选对赛道可大有学问, 因为赛道的选择是成功与否的关键, 赛道要既不拥挤, 又有可行性, 既有创新性, 又有经济性……当然优质的赛道常常是技术门槛较

高、最具挑战性的。

6 技术创新的魅力

碳化硅现在的主流尺寸是4—6英寸, 正在向8英寸转变; 硅基氮化镓的主流尺寸是6—8英寸, 正在向12英寸过渡。半导体材料领域都在追求大尺寸的动力在于, 这是降低器件成本的最佳途径; 随着尺寸的增加, 材料成本基本同比例增加, 但是器件流片成本增加不大, 因为大尺寸可以制备更多器件, 故最终单个器件成本可以大幅降低。当然大尺寸必然带来投资强度的增加, 但从长远及投资回报收益来看, 只要有足够的市场需求, 这种向大尺寸的投资是明智的选择。

如前所述, 降低碳化硅衬底成本是当前第三代半导体电力电子产业的核心任务。方法基本有四: 一是增加产能规模, 通过规模效应摊薄研发成本及人力成本; 二是引入智能制造手段, 通过高效的数据及流程控制, 提高生产效率; 三是继续提高并优化现有

PVT(物理气相传输)长晶技术, 改善切磨抛工艺, 提高碳化硅衬底的综合良率; 四是开发颠覆性创新技术(如液相熔体长晶技术、激光切割技术(图3)、Grinding技术等), 突破现有传统技术的极限瓶颈, 实现成本的显著下降。方法一及二属于非技术手段, 改善空间有限, 方法三由于

PVT技术及常规加工技术(多线切割、研磨抛光)的固有禀性(生长速度慢、扩径难、长厚难、实时监控手段有限、加工效率低等), 导致改善空间也受限, 估计通过前三个方法, 碳化硅衬底价格最多能降到硅衬底的30倍左右。再进一步降低就必须依靠方法四了, 这也正是技术创新的魅力, 其实在很多领域也都是如此, 产业问题及瓶颈孕育着技术创新, 技术创新又推动着产业的发展和变革。第三代半导体电力电子产业瓶颈也必将被颠覆性创新技术所突破, 驱动第三代半导体产业走向巅峰!

目前颠覆性创新技术因起步较晚尚未产业化, 但在各方面取得了可喜的成果, 如利用碳化硅液相熔体长晶技术, 日本名古屋大学已实现了7英寸晶体的生长, 晶体品质相比PVT法也有很大提升, 并且能够生长低阻p型单晶, 为碳化硅n沟道IGBT提供了材料基础, 这是超越PVT法而极具颠覆意义的成绩。目前碳化硅液相熔体法主要研究多元助溶剂助溶机理, 构建金属等多元活性助溶剂体系, 实现碳源的快速持续供应, 以实现快速生长, 提高长晶效率; 研究位错转变与消除的机理, 通过对生长晶体中不同水平位置, 以及同一水平面内不同区域的位错密度分布的分析, 可以得到位错在液相生长过程中消除的宏观规律; 以及开发长晶实时温场控制技术, 可实现多点温度实时监控, 温场空间实时稳定可调, 固液界面状态实时图像监控, 最终实现实时可控生长, 提高产品良率; 开发固液界面稳定技术, 实现碳源的近程输运, 降低熔体的自然对流场强度, 热对流与强迫对流的适度平衡, 保障稳定的固液界面, 实现

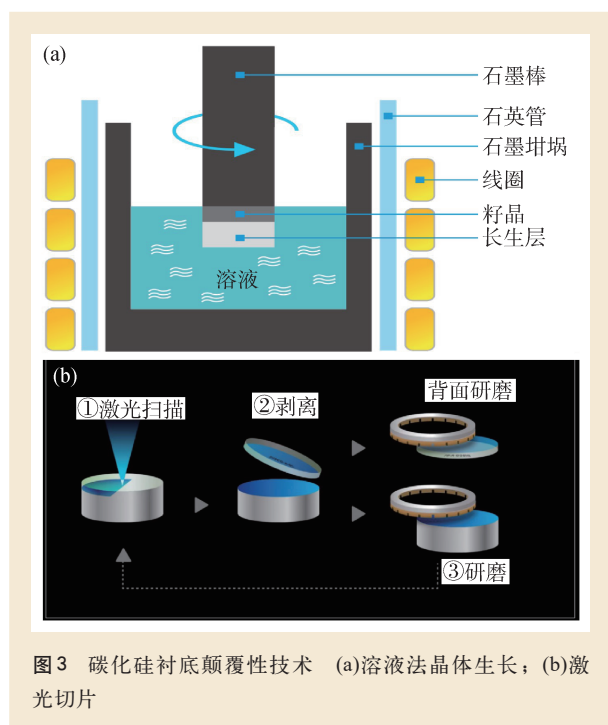


图3 碳化硅衬底颠覆性技术 (a)溶液法晶体生长; (b)激光切片

长时间稳定生长，提高长晶厚度。

关于碳化硅激光切割技术，目前主要有日本 Disco 及中国大族激光等设备公司在开发，可以实现高效低损耗的碳化硅晶体切割技术，从而解决现有多线切割技术的切割速度慢、出片率低的痛点问题。目前碳化硅激光切割主要研究的内容是如何提高激光聚焦深度、优化聚焦光斑及能量以最小化激光烧灼损伤深度、切割界面粗糙度降低及界面快速平整抛光问题。碳化硅 Grinding 技术是一种固体磨削技术，可以解决现有流体研磨、抛光技术速度慢、效率低和成本高的痛点问题，目前碳化硅 Grinding 技术主要研究如何解决磨削发热问题及高精度砂轮制备技术等。

7 人才是核心竞争力

与很多行业一样，半导体产业如同一道菜，兴衰成败关键看三要素，好食材(材料)、好刀(装备)、好厨艺(工艺)。无好食材，巧妇难为无米之炊；无好刀，磨刀不误砍柴工；无厨艺，好东西成摆设，明珠暗投。好材料需要好的材料工程师来制备，好装备需要优秀的设备工程师来制造，好的工艺需要卓越的工艺工程师来开发，因此人才是半导体产业的核心竞争力。

我们知道，相比于第一、二代半导体，我国第三代半导体技术与国际先进水平虽然没有大的代际级别的差距，但是也至少有 5 年以上的距离，这主要表现在材料的尺寸及品质上，器件的性能、良率，和模块封装的可靠性及电路拓扑应用的实战技术上，以及大部分所需的核心半导体装备都是进口的，国产化率很低等。这些差距都会直接影响到产业应用的拓展及市场占有

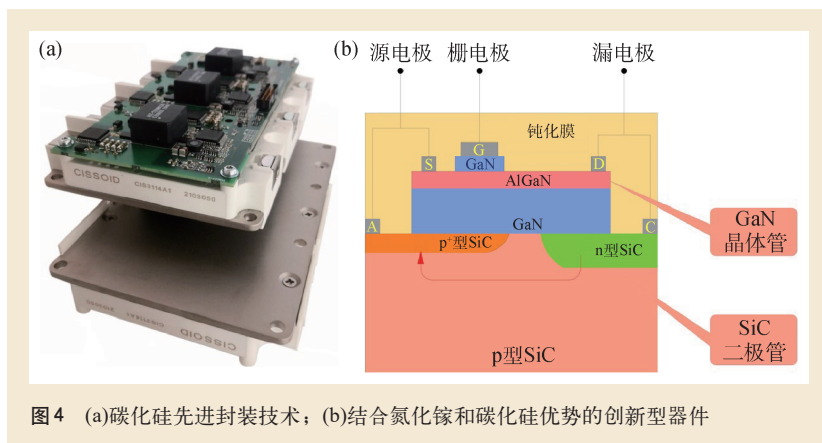


图4 (a)碳化硅先进封装技术；(b)结合氮化镓和碳化硅优势的创新型器件

率。众所周知，车规级器件门槛高，认证周期长。因此，我国的差距就会直接影响到我国第三代半导体材料及其器件进入车规应用，而新能源汽车应用恰恰是第三代半导体应用的最大蓝海市场。材料、装备、工艺都需要各类专业高端人才去攻关、突破和实现，根据产业发展态势及对应人均产值，《中国集成电路产业人才白皮书》预测，2022年前后全行业人才需求达到75万左右，其中设计业为27万人，制造业为27万人，封装测试为21万人，目前直接从事集成电路产业的人员规模约为52万人，因此行业人才仍有23万的缺口存在。重视教育，重视人才的培养是关键所在。目前，很多高校把集成电路提升为一级学科，如北京大学、清华大学、南京大学、中山大学等相继设立集成电路学院，或许我们把对了脉络，更看到了微光在不远处的闪现。

8 量身定做乃是器件之道

没有完美的材料，同样也没有完美的器件，量身定做乃是器件之道。

SiC 电力电子器件，外延厚度决定电压， $1\ \mu\text{m}$ 可以实现100 V左右，故650 V器件一般为 $6\ \mu\text{m}$ 左右。芯片面积决定电流，因为电流密度是材料的一种固有特性，碳化硅在

几百 $\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 左右。与硅器件相比，碳化硅器件工艺类似，不同之处在于几个高温工艺，如高温离子注入、高温氧化和高温退火。器件特性包括性能(静态特性、动态特性)和可靠性，器件性能如同运动员的爆发力，可靠性如同耐力，需要根据器件的不同应用场景，量身定做，不同的设计，不同的工艺，才能打造出最合适的短跑型、中长跑型或马拉松型器件，因此没有最好的器件，只有最合适的器件。在不同性能间找平衡实际上也是一种“量身定做”，你是要“单项田径”型器件，还是“十项全能”型器件。

碳化硅器件及模块封装是个很重要的课题，现今碳化硅器件及模块的四高性能(高温、高频、高压、高功率)远远没有表现出来，主要障碍就是封装，因为碳化硅材料本身固然擅长四高，但给它穿的衣服，亦或是它的队友封装材料及方式，远远跟不上碳化硅的发展，达不到这个四高要求，因此碳化硅封装问题就是“好马配好鞍”的问题。

氮化镓 HEMT 因为有极高迁移率的二维电子气，故有很好的导通及开关特性；碳化硅 MOSFET 因有内置体二极管，故有很好的反向特性，如果能够把二者的优点集中起来将是一个完美的器件，属于“限

量版”的“量身定做”，这也正是第三代半导体器件发展的一个重要方向，日本先进工业科学技术研究所(AIST)宣布，他们成功开发了全球首颗 GaN HEMT 与 SiC SBD 的集成单芯片原型(图4)。据介绍，该原型混合晶体管实现了低导通电阻(GaN 的特性)和非破坏性击穿能力(SiC 二极管的优势)，因此有望应用于要求高可靠性的电动汽车和光伏发电等领域。这是第三代半导体的两大明星材料碳化硅与氮化镓在微波射频领域的首次典范合作后的又一次完美佳作。

9 认清本位最重要

第三代半导体很有用，但仅局限在分立器件，至今尚不能用于集成电路，而集成电路却是半导体器件最大的应用市场(硅的天下)，占

比80%以上(目前约4000亿美元左右，逐年增加)，而现今功率电子器件市场大概在400亿美元(存量市场)，被第一、二、三代半导体共同分享，其中第三代半导体现今仅分享了其中10亿美元左右的份额。当然第三代半导体的主要应用是新能源汽车及5G基站，属于增量市场。将来新能源汽车的年最大市场有数千万辆，约五百亿美元器件体量；5G基站将来的年最大市场有数千万座，约百亿美元器件体量，由此可见第三代半导体在整个半导体世界中，就应用领域及市场体量而言，至多冠以“小弟”之名，而霸主老大哥仍然是“硅”。故此，虽在风口浪尖，众人瞩目，第三代半导体可不要飘飘然，忘了自己的“本位”啊！

10 结语

综上所述，第三代半导体是具有独特优异性能的战略先进电子材料，应用领域广泛，产业潜力巨大，不过目前技术及产业尚未成熟，需要加强关键技术研发和产业生态培育，只要政策、资本、市场、人才等各方资源配置到位，同时认清自身的“可为”与“不可为”之“本位”，第三代半导体产业必将大有可为。

参考文献

- [1] Lu M. Being Unstoppable, the Application of Silicon Carbide Power Devices in Electric Vehicles, <https://www.semi.org/en/standards-watch-2021June/sic-power-devices-in-electric-vehicles>
- [2] Cao A *et al.* 化合物半导体, 2022, 2/3: 9
- [3] 申德振. 科学观察, 2021, 16(5): 85


欧普特科技
GOLDEN WAY SCIENTIFIC

做中国专业的 光学元件与光学仪器系统集成商

TO BE A PROFESSIONAL OPTICAL COMPONENTS AND
OPTICAL INSTRUMENTS SYSTEM INTEGRATOR IN CHINA








地址：北京市朝阳区酒仙桥东路1号M7栋东5层
E/SF M7, NO.1, JIUXIANQIAO EAST ROAD, CHAOYANG DISTRICT, BEIJING

电话：010-8809 6218 / 8809 6099

邮箱：optics@goldway.com.cn

北京欧普特科技有限公司
Beijing Golden Way Scientific Co., Ltd.