

# 三大半导体新材料备战产业化

本报记者 许子皓

当下,新一代半导体材料技术不断突破,已经开始从实验室走向生产线,强悍的性能提升和广阔的应用场景备受业界关注。

新一代半导体材料与宽禁带半导体材料的本质区别就是具有更加优异的物理化学特性,以禁带宽度为例,新一代半导体材料的禁带宽度大于3.4eV,远高于此前的材料。这一特性使它们能够在更短的波长下工作,尤其是在深紫外(UVC)波段(200nm~280nm)的光电器件应用中极具潜力,而氧化镓、金刚石、氮化铝就是其中的佼佼者。

## 氧化镓:性价比之王

“氧化镓是一种新型超宽禁带半导体材料,与碳化硅、氮化镓相比,氧化镓的禁带宽度达到4.9eV,高于碳化硅的3.25eV和氮化镓的3.4eV,确保了其抗辐照和抗高温能力,可以在高低温、强辐射等极端环境下保持稳定的性质;而其高击穿场强的特性则确保了制备的氧化镓器件可以在超高电压下使用,有利于提高载流子收集效率。”北京科技大学新材料技术研究院教授李成明向《中国电子报》记者介绍道。

这些强大的特性使得氧化镓在功率器件领域展现出巨大的应用潜力。在功率器件应用中,氧化镓能够承受更高的电压,减少能量损耗,提高功率转换效率。例如,在智能电网中,使用氧化镓制成的电力电子器件可以实现更高效的电能传输和分配,降低电网的能耗;在新能源汽车的充电桩和逆变器中,氧化镓器件有望提高充电速度和车辆的能源利用效率。所以业内人士普遍认为,氧化镓有望替代碳化硅和氮化镓成为新一代汽车功率半导体材料的代表。

因此,市场对于氧化镓的渴望越发强烈,日本企业Novell Crystal Technology(以下简称“NCT”)预测氧化镓晶圆市场到2030年将扩大到约590亿日元规模。市场调查公司富士经济预测,2030年氧化镓功率元件的市场规模将达到1542亿日元,比当下氮化镓功率元件的规模还要大。

中国科学院院士郝跃在接受《中国电子报》记者采访时明确指出,氧化镓材料是最有可能在未来大放异彩的材料之一,在未来的10年左右时间,氧化镓器件会直接与碳化硅和氮化镓器件竞争。但氧化镓目前的研究进度还不够快,仍需不懈努力。

氧化镓芯片技术研发进度缓慢的主要原因在于,氧化镓的制备还需要解决很多技术难题。大尺寸低缺陷氧化镓晶圆的制备方法以及高表面质量氧化镓晶片的超精密加工技术,是实现氧化镓半导体器件工业应用的主要瓶颈。氧化镓的熔点很高,在1740℃左右,并且在高温下具有易分解、易开裂的特点,这使得大尺寸产品的制备难度极高。传统的制备工艺,如导模法(EFG法)需要在1800℃左右的高温、含氧环境下进行晶体生长,对生长环境要求极为苛刻。该工艺需要使用耐高温、耐氧且不污染晶体的材料制作坩埚,综合考虑性能和成本,只有贵金属铌适合盛装氧化镓熔体。然而,铌的价格昂贵,是黄金的3倍左右,6英寸设备需要几公斤的铌,仅坩埚造价就超过600万元,在大规模生产层面限制了设备数量的扩展。

虽然有研究提出了无氧工艺,为降低氧化镓制备成本带来了希望,但这些新工艺仍



图为镓仁半导体研发的全球首颗氧化镓8英寸单晶

处于探索阶段,尚未完全成熟,距离大规模工业化应用还有一段距离。在实际生产中,如何优化这些新工艺,提高晶体生长的质量和稳定性,以及降低生产成本,仍是亟待解决的问题。

中国科学院半导体研究所研究员闫建昌表示:“散热能力不足是氧化镓的弊端,如何绕开这个弊端,去充分发挥它在功率器件上的优势,是值得关注的研究方向。氧化镓在器件和产业发展上还有很大的空间,发展的基础取决于材料本身和制备水平,要实现更低的缺陷密度,把材料的优势和潜力充分发掘出来,是超宽禁带技术和产业发展的基础。”

因此,氧化镓研发周期非常漫长。于2015年成立的NCT始终致力于氧化镓晶体研发,直到2021年6月16日,才在全球首次成功量产以氧化镓制成的100毫米晶圆,为后续氧化镓在功率半导体等领域的应用奠定了基础。目前,NCT主导了全球90%的氧化镓晶圆衬底市场,且已实现6英寸氧化镓晶圆量产。

而我国近几年的研发进度持续提速,步入全球领先行列。3月5日,镓仁半导体采用独立创新的铸造法,成功发布全球首颗氧化镓8英寸单晶,这一成果标志着中国成为全球首个掌握8英寸氧化镓单晶生长技术的国家,打破了大尺寸氧化镓单晶“日本主导,中美欧追赶”的格局。据了解,镓仁半导体采用的铸造法,不仅成功实现了8英寸氧化镓单晶生长,还能加工出相应尺寸的晶圆衬底,并且可以与现有硅芯片厂的8英寸生产线兼容,降低了生产成本,提高了生产效率。

## 金刚石:性能天花板

金刚石同样是一种极具潜力的新一代半导体材料,拥有一系列令人惊叹的物理特

性。金刚石的禁带宽度高达5.45eV,是硅的近3倍,这一特性赋予金刚石卓越的稳定性和可靠性,使其能够在高温、高电压环境下稳定工作。同时,金刚石的热导率极高,室温下可达2200W/(m·K),是硅的13倍,极大地提高了芯片的散热效率,从而提升了整个电子设备的性能和稳定性。此外,金刚石还具有高击穿电场强度,可达10MV/cm以上,这使其在高功率、高频率器件的应用中展现出巨大优势。这些卓越的性能都是目前已知材料中最高的,让金刚石成为半导体领域梦寐以求的理想材料,可以满足未来大功率、强电场和抗辐射等方面的需求。

专家表示,金刚石半导体的应用前景极为广阔,在众多领域都展现出巨大的应用潜力。在电子信息领域,基于金刚石的高频、高功率器件可用于5G和6G通信基站,能够显著提高信号传输速度和稳定性,降低能耗。在能源领域,金刚石基功率器件可用于高效能源转换和存储系统,如电动汽车的电池管理系统和光伏逆变器,提高了能源利用效率。在航空航天领域,金刚石半导体的高稳定性和抗辐射性能使其成为关键材料,用于制造高性能雷达、卫星通信设备等。此外,在医疗、传感器等领域,金刚石半导体也具有广泛的应用前景。

然而,目前金刚石半导体材料的制备技术难度较高,成本高昂,限制了其大规模应用,亟须在制备工艺上取得突破。由于金刚石的生长过程对设备和工艺要求极高,如何在保证材料质量的前提下,实现高效、低成本的生产,是产业发展亟待解决的问题。此外,金刚石与现有半导体工艺的兼容性也需要进一步研究和改进。由于金刚石的物理化学性质与传统半导体材料存在较大差异,如何将其更好地融入现有的半导体制造流程,是金刚石半导体未来应用的关键。

科学家们很早就开启了对金刚石的开发研究。早在20世纪70年代,美国科学家

就开发出利用高温高压法(HPHT)生长小块状金刚石单晶,开启了金刚石研究的热潮。

根据李成明的介绍,近年来金刚石功率电子学在材料和器件方面均有新的技术突破。在材料方面,采用高温高压法制备的单晶金刚石直径已达20mm,且缺陷密度较低。如果是采用化学气相沉积(CVD)法,同质外延生长的独立单晶薄片具有缺陷密度低的特点,最大尺寸可达1英寸;采用“平铺克隆”晶片的马赛克拼接技术生长的金刚石晶圆可达2英寸。而采用金刚石异质外延技术的晶圆可达4英寸。如果是低成本的低质外延CVD法,金刚石多晶薄膜的发展和已很活跃,晶圆已达8英寸,已可作为导热衬底,用于新一代氮化镓功率电子器件。

## 氮化铝:禁带宽度之最

氮化铝也是超宽禁带半导体材料的重要成员,其禁带宽度高达6.2eV,能够在更短的波长下工作,尤其在深紫外光电器件方面具有巨大的应用潜力。同时,氮化铝拥有高击穿电场强度,可达15.4MV/cm,能够承受更高的电压,在高功率、高压应用场景中表现出色。此外,氮化铝的热导率极高,达到340W/(m·K),在散热方面优势显著,能够有效解决芯片在高功率运行时的过热问题,提高电子设备的稳定性和可靠性。而且,氮化铝还具备出色的化学和热稳定性,以及良好的紫外透过率。

氮化铝的应用领域非常广泛,在电力电子领域,随着各行业向电气化迈进,对高效电力转换与分配系统的需求日益增长。基于氮化铝的器件能够显著提升电力转换与分配系统的能源效率。因其超宽禁带,可实现耐压大于10千伏的器件,有助于减小系统尺寸并增强控制能力。例如,在电

网级应用中,氮化铝衬底仅需15μm厚度即可满足10kV变电站需求,相比传统材料可减少70%体积。美国佐治亚理工大学指出,氮化铝是下一代柔性智能电网的首选半导体材料。此外,有报道称,氮化铝基功率器件在DC-DC/DC-AC转换过程中的能耗损失仅是碳化硅和氮化镓的八分之一,在新能源汽车800V高压平台下,氮化铝可使电机控制器效率提升5%,还能使光伏逆变器的系统损耗降低30%。

在微波射频领域,为实现5G通信、卫星通信、相控阵雷达等应用所需的顶尖性能,需要解决器件、模组的散热和高热边界问题。基于氮化铝平台的器件能在常用的氮化镓射频高电子迁移率晶体管(GaN RF HEMT)之间提供低热边界电阻,同时具备高热导率,可有效解决射频器件的热管理难题。预计未来,使用氮化铝的5G甚至6G基站的功放效率可突破65%,基站能耗将下降40%,相控阵雷达的功率密度将提升3倍,探测距离增加50%。

在航空航天方面,采用氮化铝材料可以使深地探测器在300℃地热环境中稳定工作超过10万小时。氮化铝还能将空间站电源系统的抗辐射能力提升100倍,使用寿命延长至15年。

但氮化铝同样在制备高质量的大尺寸单晶和降低位错密度方面面临挑战。一方面,氮化铝单晶的生长难度较大,制备大尺寸、高质量的单晶衬底成本较高。另一方面,相关的器件设计和制造工艺也需要不断创新和改进,以充分发挥氮化铝的性能优势。由于氮化铝与传统半导体材料的物理化学性质存在差异,现有的半导体制造工艺难以直接应用于氮化铝器件的生产,需要开发新的工艺和设备。

在科研领域,氮化铝不断取得重要突破。德国弗劳恩霍夫集成系统与器件技术研究所(Fraunhofer IISB)的研究人员通过优化晶体生长工艺,成功制备出低缺陷密度的氮化铝外延层。基于该外延层制作的氮化铝肖特基二极管,在测试中展现出高达2200伏的击穿电压,且在高电流密度下仍能保持较低的导通电阻,其功率密度相较于传统碳化硅和氮化镓基功率开关器件有显著提升。

美国Crystal IS(旭化成全资子公司)已相继开发出3英寸、4英寸氮化铝单晶衬底样品。我国的奥趋光电技术(杭州)有限公司也取得了显著成果,分别成功开发出3英寸氮化铝单晶和超高深紫外光透过率2英寸单晶衬底。

除了上述最具代表性的三大“猛将”,还有另一类新一代半导体材料——超窄禁带半导体材料,以铍化镓、铍化铝等为代表,它们的禁带宽度在零点几电子伏特(eV)范围。这类材料的电子容易被激发跃迁,迁移率高,主要应用于红外探测、激光器等领域。在红外探测器领域,铍化铝凭借其高电子迁移率和对红外光的高灵敏度,能够实现微弱红外信号的快速检测和精确成像,广泛应用于工业检测、医学成像等领域;铍化镓则在红外激光器的制造中发挥重要作用,可用于光通信、激光雷达等应用场景,为实现高精度的距离测量和信息传输提供支持。

当前,新一代半导体材料在量产方面仍面临诸多挑战,无论是制备工艺还是成本问题都是制约产业发展的关键因素,但随着当下的技术突破速度不断加快,相信很快就能看到新一代半导体材料发挥出真正的实力。

罗万象的IP内核组合;其二为EDA平台创新,使用强化学习等手段对EDA工具进行升级;其三则是推出高级封装解决方案。

反观国内,国内头部EDA厂商基本上都有性能领先的产品,且已经取得了较高的市场认可度,但仍没有一家企业能够实现完整的工具链布局。国内企业基本上仍然将扩充产品线作为重要的发展战略;在自己专长的领域拓展产品线,或致力于发展全流程的解决方案。

基于此,对于如何推动中国EDA产业的持续健康发展,业界代表给出了三条建议。一是注重研发。EDA行业的核心生命力在于不断地技术创新和突破,作为典型的高研发投入行业,部分EDA企业的研发支出甚至占到总成本的70%以上。二是加强知识产权保护力度,芯片设计企业要主动拒绝盗版软件,为EDA软件的商业化应用构建良好的市场基础。三是关注生态。抵制同质化恶性竞争,坚持通过持续的研发投入开发出更具竞争力的产品,形成良性循环。

刘伟平还提出,要推动EDA工具认证。目前工具认证工作仍然非常复杂,还牵涉芯片质量责任划分的问题。例如,一款芯片生产出来后,如果客户发现成品率不高,就会沿着供应链路径向上追责。在这种情况下,工具是否通过了认证就非常重要。如果工具已经通过认证,那么问题就会被归在制造端;如果工具没有通过认证,那么设计公司就要承担责任。

(上接第1版)

2月28日,国产FPGA芯片设计EDA软件亿灵思(eLinX)宣布接入DeepSeek,支持快速生成FPGA功能模块,精确识别代码语法和逻辑错误,提升代码性能三个主要功能。

3月18日,具有CAD/CAE/EDA/HPC/RVC自主开发能力的国产工业软件企业黛西软件宣布与DeepSeek大模型、通义千问达成深度合作技术融合,将支持通过复杂数据分析与预测模型优化仿真参数设计,减少试错成本。例如在汽车碰撞仿真中,AI自动推荐最优材料组合方案,缩短了验证周期。此外,该合作还将支持跨学科仿真,自动识别多学科仿真冲突(如结构强度与热力学矛盾)并提供优化建议。

再看海外EDA厂商,其适配市面上通用大模型的消息可谓风毛麟角。

很多企业选择了布局原生AI应用的发展路线,且很多功能已经用在生产中。北京华九天科技股份有限公司董事长刘伟平在接受《中国电子报》记者采访时表示,部分工具已经开始采用AI技术,帮助工程师实现了明显的效率提升,有些原来需要做10个小时的工作,现在1个小时就能完成。

“加速”“提高效率”,是记者问及AI给EDA业务带来的影响时最常听到的答案。但业界人士似乎仍对更高阶、更智能的EDA AI应用表示怀疑。

原因有三个。一是,AI的训练需要大量的行业数据,这需要长时间、海量的数据

积累,如果没有量的积累,模型的可靠性就无从谈起。二是,EDA行业对精确度的要求很高,而模型的基本运行逻辑是推理,推理的结果很难实现绝对的精准。三是,芯片产业试错成本极高,在AI可靠性存疑的情况下,没有厂商敢冒良品率下降的风险贸然采用。

Cadence副总裁、中国区总经理汪晓煜在接受记者采访时表示:“半导体行业的每家企业都把数据安全性看得非常重要。如果没有足够的训练数据,对于这个所谓的‘大模型’,客户是不敢用的。如果功能无法大规模应用上线,永远停留在实验版本,那么这种产品对于企业来说就没有太大的意义。”

## 企业要“系统”地思考问题

EDA公司业务正在逐步向系统软件拓展,这已经成为不争的事实。

在这种需求的驱使下,新思科技宣布以350亿美元收购工业软件巨头Ansys,该交易已经获得英国竞争与市场管理局与欧洲委员会的批准。Cadence宣布收购BE-TA CAE Systems International AG,以补充

面向汽车、航空航天、工业和医疗保健领域的系统分析产品线。

系统级产品的设计理念与流程正在发生巨大的变化。虽然芯片工艺的推进速度正在放缓,但芯片产品的迭代速度并没有放慢。新思科技总裁兼首席执行官盖思新曾在公司开发者大会上坦言:“过去10年到15年,我们客户的客户,也就是系统公司,往往会基于摩尔定律规划下一个产品版本的功率、性能和成本,可预测性非常高。但现在,一切都变了,摩尔定律的可预测性、经济性和成本都发生了巨大变化。”

基于这一趋势,EDA厂商服务客户的逻辑发生了变化:从跟随摩尔定律的演进,转向更加注重终端的应用需求。其视野不再局限于如何为客户打造高性能芯片,而是从研究终端市场的发展趋势着手,反观什么样的系统、芯片能够服务这样的终端。再基于这样的观察,为客户提供更能够满足终端市场需要的服务。换言之,就是帮助芯片厂商设计出更符合其客户需要的产品。

当问及哪个方向能支撑起未来整个行业的增长,刘伟平也着重提到“系统级市场”。在他看来,系统级产品要想提升自己

的竞争力,不能仅仅靠采购芯片,而是要深入到芯片设计领域。很多系统级产品企业已经在自建芯片设计团队或者与芯片设计公司合作,为自己的产品做个性化开发。这就带动了EDA企业向系统化和芯片与系统相结合的方向做业务延展。

## 国内外企业有不同路径

在EDA行业,国内外正在沿着两条不同的路径推进。

海外EDA厂商已经形成相对稳定的寡头垄断格局,三大EDA头部企业——新思科技(Synopsys)、楷登电子(Cadence)与西门子EDA(原Mentor Graphics)已经实现对全流程EDA工具解决方案的布局,占据了全球超70%的市场。有研究机构预测称,在三大企业完成各自的并购案之后,总体的市场规模可能达到90%以上。对于这些企业来说,除持续扩大并购企业范围、拓展经营领域外,也将关注点更多地放在了通过多样化的方式帮助客户适应快速变化的市场环境中。

盖思新提出其业务发展的三大重点。其一是补充IP内核产品线,为客户提供包

# AI来袭,EDA如何进化?