**新一代半导体材料强势来袭**

来源：中国电子报、电子信息产业网 作者：许子皓

半导体材料是现代科技的先导和基石。从硅（Si）、锗（Ge），到砷化镓（GaAs）、磷化铟（InP），再到碳化硅（SiC）、氮化镓（GaN），材料始终是推动产业进步的核心要素。如今，以氧化镓（Ga₂O₃）、金刚石（C）、氮化铝（AlN）为代表的新一代半导体材料也开始崭露头角，各大企业加紧布局，单晶生长、外延薄膜等技术突破的消息频频涌现，产线建设和产能释放提上日程。

备受瞩目的氧化镓 半导体代表性材料进阶图备受瞩目的氧化镓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带隙宽度大于3.4eV，远高于前几代材料。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，而氧化镓就是其中的佼佼者。

“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了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》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愈发强烈，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》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。但氧化镓目前的研发进度还不够快，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单晶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，只有贵金属铱适合盛装氧化镓熔体。然而，铱的价格昂贵，是黄金的三倍左右，6英寸设备需要几公斤的铱，仅坩埚造价就超过600万，在大规模生产层面限制了设备数量的扩展。

虽然有研究报道了无铱工艺，为降低氧化镓制备成本带来了希望，但这些新工艺仍处于探索阶段，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向《中国电子报》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的优势，是值得关注的发展方向。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广泛应用奠定了基础。目前，NCT主导了全球90%的氧化镓单晶衬底市场，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，并且可以与现有硅基芯片厂的8英寸生产线兼容，降低了生产成本，提高了生产效率。

同时，富加镓业宣布其氧化镓MOCVD同质外延技术取得突破，在氧化镓单晶衬底上生长的同质外延薄膜厚度首次突破10微米，标准化产品将于同年4月正式上市。2024年9月，其打造的国内首条6英寸氧化镓单晶及外延片生长线在杭州富阳开工建设，预计2025年年初投入使用，未来将实现年产万片生产规模，进一步推动氧化镓材料在市场上的供应和应用。

除了这两家企业，我国从事氧化镓材料和器件的企业还有北京镓族科技、苏州镓和、苏州镓耀等，以及一些开始试水的初创公司，共同促进我国在新一代半导体材料领域提速发展。

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。

西安电子科技大学教授张金风向《中国电子报》指出，金刚石属于新兴的超宽禁带半导体材料，具有禁带宽度大、耐击穿、载流子迁移率高、热导率极高、抗辐照等优点。在热沉、大功率、高频器件、光学窗口、量子信息等领域具有极大应用潜力。

具体来看，金刚石的禁带宽度高达5.45eV，是硅的近三倍，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质量，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航空航天的关键材料，可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，亟需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。如果是低成本的异质外延CVD法，金刚石多晶薄膜的发展和应用已很活跃，晶圆已达8英寸，已可作为导热衬底，用于新一代GaN功率电子器件。

近年来，我国在金刚石方面的研究也取得了一系列突破。全球人造金刚石产能第一的黄河旋风，凭借其在高温高压法（HPHT）和化学气相沉积法（CVD）的深厚技术积累，与华为展开深度合作。双方联合开发热导率超2000W/m・K的多晶金刚石热沉片，该产品主要用于5G基站和AI芯片散热，有效解决了高算力设备在运行过程中的散热难题。同时，黄河旋风还积极布局半导体衬底材料研发，致力于在金刚石半导体产业链上占据更有利的位置。

设备方面，北方华创作为国内半导体设备的领军企业，积极布局新一代半导体材料设备研发，向国内多家研究机构提供用于金刚石等新一代半导体材料的晶体生长设备。晶体生长设备是半导体材料产业化的核心装备，使科研人员能够精确控制金刚石晶体的生长条件，制备出高质量的金刚石衬底和外延层，为后续金刚石半导体器件的制造提供了支持。

蓄势待发的氮化铝 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。因其超宽带隙，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SiC/GaN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、卫星通讯、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，同时具备高体热导率，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，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片。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。

除了最具代表性的三大“猛将”，还有另一类新一代半导体材料名为超窄禁带半导体材料，以锑化镓（GaSb）、锑化铟（InSb）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。在红外探测器中，锑化铟凭借其高电子迁移率和对红外光的高灵敏度，能够实现对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；锑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。

总体来看，新一代半导体材料对于半导体行业的发展具有不可估量的重要性，有望突破现有半导体材料的性能瓶颈，满足未来电子设备对高性能、高可靠性、低能耗的需求，推动半导体行业向更高层次发展。但新一代半导体目前的研发都面临着制备工艺不成熟、成本居高不下、与现有半导体制造工艺的兼容性差等关键难题。而且，由于新一代半导体材料是新兴领域，相关的产业链配套不完善，原材料供应、设备制造、器件封装测试等环节都存在不足，制约了产业的快速发展。因此，业界应该更加重视新一代半导体材料的研发和产业化，促进政产学研用金形成合力，加强协同创新，推动产业的发展。