

扬帆芯未来,助力新基建, 大力推进第三代半导体制造装备国产化

王志越¹, 巩小亮^{1,2}, 付丙磊³

1. 中电科电子装备集团有限公司, 北京 100070

2. 中国电子科技集团公司第四十八研究所, 长沙 410111

3. 华锦控股集团有限公司, 北京 100000

摘要 第三代半导体以碳化硅、氮化镓等材料为代表,已经在5G基站、新能源汽车充电桩等新基建领域崭露头角。第三代半导体加工工艺具有高温、高能量、低损伤等特点和要求,决定了其制造装备相对通用半导体制造装备具有独特性。综述了第三代半导体制造装备需求及其国产化现状,提出了相关产业发展建议:以企业为主体,产学研用协同创新;着力装备共性技术,培育自主零部件配套体系;加强创新人才培养,增强产业发展后劲。

关键词 第三代半导体;制造装备;半导体产业

第三代半导体材料以碳化硅(SiC)、氮化镓(GaN)为基础,相对于以硅(Si)和锗(Ge)为代表的第一代半导体材料和以砷化镓(GaAs)和磷化铟(InP)为代表的第二代半导体材料,第三代半导体材料具有耐高压、耐高温、抗辐射、高频等优越性能,是新一代固态光源及探测器、电力电子器件、微波射频器件的理想选择^[1]。当前,第三代半导体已成为5G通信、智能电网、轨道交通、新能源汽车充电桩等新基建领域的“核心”,并被大量应用于雷达、电子对抗、探测告警等武器装备领域,成为国际间战略竞争的焦点和美国对中国技术遏制的热点。

半导体装备作为半导体产业链中最上游最基础的环节,是电子信息产业的工业母机,是元器件

和整机系统发展的原动力和放大器,是相关高科技产业的立身之本。第三代半导体器件制造主要基于100~150 mm Si集成电路成熟设备,以及部分与材料特性紧密相关的专用材料、器件制造设备。经过多年发展,中国第三代半导体产业初具规模,半导体设备技术及产业布局相对完整,在第三代半导体产业腾飞的前夜及中外技术竞争愈演愈烈的当下,第三代半导体制造装备国产化正当时。

1 通用半导体制造装备

自1947年晶体管发明以来,经过70余年的发展,半导体产业创造了人类科技及工程学上的奇

收稿日期:2020-08-10;修回日期:2021-02-04

作者简介:王志越,研究员,研究方向为电子专用设备及配套工艺,电子信箱:wangzhy@45inst.com

引用格式:王志越, 巩小亮, 付丙磊. 扬帆芯未来,助力新基建,大力推进第三代半导体制造装备国产化[J]. 科技导报, 2021, 39(14): 83-91;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.14.008

迹。半导体大生产线加工制造能力已进入7~5 nm 工艺节点^[2],形成了光刻机、刻蚀机、离子注入机、扩散设备、薄膜设备、湿法工艺设备、化学机械平坦化(chemical mechanical polishing, CMP)设备、电化学沉积(electrochemistry deposition, ECD)设备等为代表的半导体工艺设备体系。第三代半导体器件加工精度一般为微米、亚微米量级,且不需要做大规模集成,因而应用CMP、ECD设备较少,主要工艺设备包括光刻机、刻蚀机、离子注入机、扩散设备、薄膜设备、湿法工艺设备等六大类。

1.1 光刻机

光刻机主要基于光刻胶曝光原理,在晶圆表面形成待加工的图形。以正性光刻为例,光刻胶曝光后,受到光线照射的部分溶解,未溶解的部分形成后续刻蚀的阻挡层,实现图形由掩模版向晶圆表面光刻胶的转移。光刻机分辨率与曝光波长成正比,为了形成更精细的图形,曝光光源逐渐缩短,沿以下路径发展:436 nm G线光源(0.5 μm 以上光刻)→365 nm I线光源(0.8~0.25 μm 光刻)→248 nm KrF准分子激光光源(0.5~0.13 μm 光刻)→193 nm ArF准分子激光光源(130~10 nm 光刻)→EUV光源(7 nm 及以下光刻)(图1^[3])。就第三代半导体器件来说,一般I线光刻即可满足器件加工的需求,少数先进器件需要使用KrF光刻或ArF光刻。

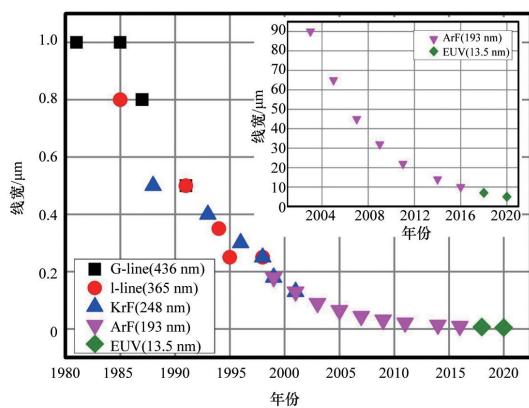


图1 光刻机光源与特征尺寸的对对应关系

1.2 刻蚀机

干法刻蚀是基于等离子体进行刻蚀的技术。一方面通过等离子体在电场加速下轰击晶圆表面,

以物理的手段刻蚀晶圆;另一方面等离子体可以与晶圆发生反应,以化学的手段刻蚀晶圆,从而去除光刻胶图形下未被掩蔽膜材料掩蔽的部分,实现图形由晶圆表面光刻胶到晶圆的转移。由于材料性质的不同,第三代半导体 GaN、SiC 的刻蚀工艺与 Si 相比差别较大^[4],设备需基于 Si 集成电路设备在特气系统、反应室结构、抗污染和腐蚀、安全等方面进行适应性改进。

1.3 离子注入设备

离子注入机主要用于半导体掺杂,离子源将需要注入的元素粒子电离,在加速电场的作用下注入晶圆指定区域,完成掺杂过程。由于材料性质的差异,第三代半导体离子注入工艺及设备与 Si 集成电路离子注入区别较大,需开发专用离子注入设备,如 SiC 高温高能离子注入机等^[5]。

1.4 扩散设备

扩散设备主要用于在特定温度、特定气氛下处理晶圆,完成扩散、氧化、退火、合金等工艺。第三代半导体器件制备中,该类设备主要用于两个方面:一是栅氧的形成和注入离子的高温退火;二是金属接触的退火。就前者而言,需针对第三代半导体特性开发专用设备,例如 SiC 高温退火炉、高温氧化炉等^[6];后者一般可选用 Si 集成电路成熟设备。

1.5 薄膜设备

薄膜设备主要用于有源区、介质层、互联金属等的沉积,可以分为物理气相沉积(PVD)和化学气相沉积(CVD)两大类。物理气相沉积主要包括蒸发、溅射等,薄膜沉积的整个过程主要为物理变化;化学气相沉积主要包括金属有机物化学气相沉积(MOCVD)、低压化学气相沉积(LPCVD)、等离子体增强化学气相沉积(PECVD)等,首先通过化学反应形成薄膜产物,进而沉积形成薄膜。第三代半导体薄膜设备主要可以分为两大类,一类为用于 SiC、GaN 有源区外延生长的 CVD、MOCVD 设备,此类设备为第三代半导体专用设备,后述详细介绍;另一类为用于介质层沉积的 LPCVD、PECVD 设备,以及用于金属沉积的蒸镀、溅射设备,此类工艺主要基于 Si 集成电路设备实现,需根据第三代半导体材料

特性及工艺要求做适应性改造,例如 GaN 微波射频器件钝化层/介质层沉积工艺对低应力和低损伤方面要求极高,欧姆接触的金属材料不同等^[7]。

1.6 湿法工艺设备

湿法工艺主要包括清洗、去胶、湿法刻蚀等工艺步骤,用于晶圆表面清洁、去除残存光刻胶、刻蚀形成图形等,是集成电路产线用量最多的设备之一,占制造工序总量的 20%~30%。第三代半导体湿法工艺可采用成熟 Si 基集成电路设备。

2 第三代半导体制造特点及工艺装备要求

第三代半导体的主要应用领域包括新一代固态光源、微波射频器件及电力电子器件。当前基于 GaN 材料的半导体照明技术及市场已经成熟,第三

代半导体器件的发展重点主要在于 GaN 射频器件和 SiC 电力电子器件^[8],典型器件包括 SiC 基 GaN 射频器件、SiC 电力电子器件和基于 Si 基 GaN 的中小功率电力电子和射频器件。

第三代半导体制造流程涉及衬底、外延、芯片和封装 4 个主要环节(图 2)。第三代半导体器件制造技术的发展一方面基于 Si 器件制造技术和装备的强大基础,例如图形化、金属化、钝化等环节 Si 基半导体工艺技术和装备同样适用于第三代半导体;另一方面, SiC 和 GaN 材料的特性决定了其关键环节的要求不同于硅基器件,涉及到晶体生长、外延生长、高温注入、高温退火等专用制造装备(图 2 中黄色部分为 GaN 专用制造设备、蓝色部分为 SiC 专用制造设备)以及刻蚀、键合等在 Si 基装备基础上进行适应性改进的制造装备。

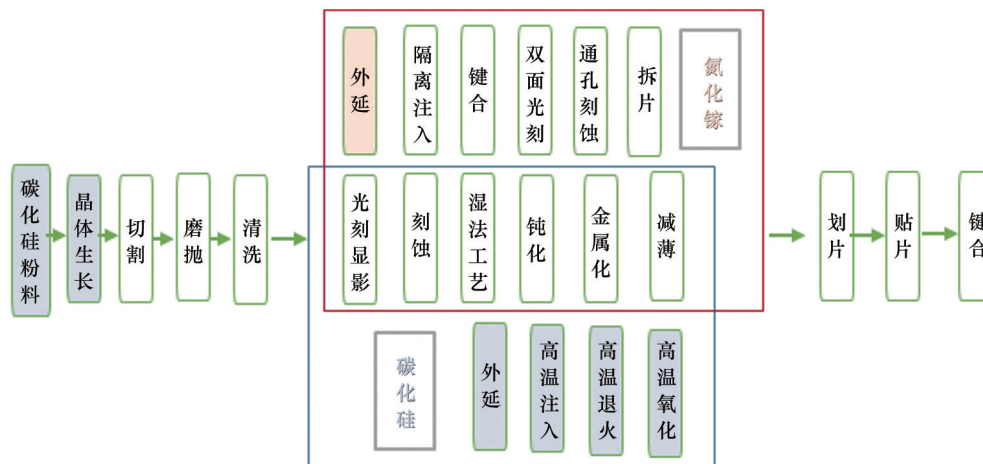


图2 第三代半导体材料和器件制造流程

2.1 第三代半导体制造特点

SiC 器件结构类似于 Si 器件,主要特点为同质外延、垂直结构和通过掺杂调节电学性能^[9]。由于 SiC 高硬度、高密度等特性,其器件制备过程存如下特殊性:一是单晶制备和晶体加工困难,如 SiC 晶体生长采用物理气相传输(PVT)技术温度高且生长慢, SiC 晶体切割、抛光加工困难且效率低;二是器件制备中涉及多种超高温和高能量工艺,如外

延、注入、退火、栅氧制备需采用专用特殊设备;三是封装过程加工工艺的特殊要求。

而 GaN 器件以异质外延、水平结构为主,通过能带设计调节电学性能,在 SiC 衬底或 Si 衬底上外延生长势垒层/沟道层材料实现高电子迁移率晶体管(HEMT)结构,涉及缓冲层、异质结等多组分材料体系,因此基于 MOCVD 的外延生长技术是构造 GaN 器件的核心^[10]。在芯片制造段, Si 基半导体设

备基本可涵盖 GaN 芯片制造需求,部分工艺如台面刻蚀、通孔刻蚀、隔离注入、临时键合和拆片等涉及到外延结构和材料特殊性,对加工损伤和应力控制要求较高,加工装备需进行进一步适应性改进或定制开发。

总体而言,第三代半导体制造的关键工艺环节由于化合物材料的特殊性和器件结构的复杂性,具备高温、高能量、低损伤等特点,成为第三代半导体制造装备面临的主要挑战。

2.2 第三代半导体制造工艺装备要求

2.2.1 超高温制造工艺装备要求

超高温制造工艺主要体现在 SiC 制备中单晶、外延、高温退火、高温氧化等环节。例如, SiC 单晶生长温度在 2000℃ 以上,外延生长温度在 1600℃ 以上,注入后激活退火温度高达 1700~1900℃,栅氧层氧化温度在 1300℃ 以上。要满足上述工艺需求,制造设备需解决超高温加热、超高温腔室、超高温可靠性等问题。超高温加热,即高温温场的实现需要突破非金属加热体系、感应加热体系以及超高温温场均匀性控制等技术,涉及非金属加热材料、加热器环绕设计、多区互补温场结构、高温梯度控制、温区实时调节等难点;超高温腔室需解决腔室的高温氧化、腐蚀、杂质沾污等问题,涉及高纯石墨、Solid SiC、SiC/TaC 特种涂层、热解石墨涂层等关键材料和结构设计技术;超高温可靠性主要体现在超高温环境下真空密封、部件强度、机械传送等方面的可靠性保障,涉及高温部件热应力控制、双层工艺管、水冷结构优化安全连锁控制等系列技术。

2.2.2 高能量加工工艺装备要求

高能量加工工艺主要体现在 SiC 离子注入、Trench 刻蚀及 GaN 器件的通孔刻蚀等环节。SiC 离子注入是实现器件 p 型选择性掺杂的关键工艺,通过高能量注入以达到器件所需的注入深度,同时实现高温注入以减小损伤和避免 3C 晶型形成。对于一般器件结构的 p-well 注入, Al⁺ 能量最高可达到 700 keV,而一些新型的沟槽结构、超级结注入等需要更高的注入能量^[11-12]。离子注入机主要通过离子源的特殊改进(增大束流、降低污染、提高寿命等)、优化多级加速系统提升离子能量、加强平行度

控制、高温靶台等新型技术满足 SiC 器件制造要求。同时,在 SiC 器件 Trench 结构、基于 SiC 衬底的 GaN 器件通孔刻蚀等工艺环节面临 SiC 材料刻蚀速率慢的问题,要求刻蚀深度高、选择比大,需要提升刻蚀能量和速率,同时控制刻蚀损伤和形貌,对于刻蚀设备的工艺适应性和效率提出较高要求。

2.2.3 低损伤加工工艺装备要求

低损伤加工工艺主要体现在 GaN 器件制造中刻蚀、薄膜制备等环节,由于外延结构的精密和复杂性,对器件加工的精确性和损伤控制提出较高要求,特别是对于 AlGaIn/GaN HEMT 结构中 AlGaIn 层的刻蚀,其刻蚀深度较小(~20 nm),同时避免对 GaN 层造成损伤^[13],须实现低速低损伤刻蚀。常规的 ICP 刻蚀设备可通过射频(RF)系统的改进实现低速高精度刻蚀,同时原子层刻蚀(ALE)等新技术已逐步应用到 GaN 器件的刻蚀工艺中^[14]。此外, GaN 器件栅极绝缘层、钝化层等薄膜工艺中采用低温 ICP-CVD、低应力 LPCVD 等新型设备技术在提升器件性能和可靠性等方面已展现出良好潜力^[7,15]。

3 第三代半导体装备国产化现状

随着国家创新驱动发展战略的实施,通过国家重大科技专项及其他军民领域科技项目的持续支持,“十一五”以来,中国相继突破了一批以集成电路装备为代表的半导体制造关键设备,扭转了中国高端半导体制造装备基本空白的被动局面,解决了从无到有的问题,使国家半导体产业生态得以基本建立。

中国高端半导体制造装备始终紧跟国际技术发展方向,除光刻机外,其他主要集成电路前道设备已经形成 28 nm 设备供货能力,14 nm 设备进入工艺验证阶段,部分 7 nm 设备进入研发阶段。产业方面,培育了一批有代表性的本土半导体设备企业,初步呈现出由国家项目支持、独立研发向市场化融资转变的市场化发展态势。

总体而言,第三代半导体国产装备随产业发展逐渐进步,已初步实现自主支撑。围绕衬底、外延、

器件和封装已形成了一批具有代表性的工艺和装备厂家。在装备领域,包括基本具备 SiC 全链条装备能力的中电科电子装备集团有限公司,以 MOCVD、刻蚀机为主的中微半导体和以刻蚀、薄膜设备为主的北方华创科技集团股份有限公司(以下简称北方华创)等。以下就典型的几种第三代半导体关键装备具体分析国产化现状及存在差距。

3.1 SiC 单晶生长设备

SiC 单晶生长国际主流的、最为成熟的生长方法是 PVT(物理气相传输)法,对应的晶体生长炉主要为中频感应炉设备^[6],国际厂家包括德国 Aixtron、德国 PVA、美国 Aymont 等。早期中国 SiC 晶体生长设备依赖进口,但目前已实现国产化,全面支撑国内 SiC 衬底产业的发展。国内 SiC 衬底主要研制生产单位如北京天科合达半导体股份有限公司、山东天岳电子科技有限公司、中国电子科技集团公司第二研究所等均采用自主研发的单晶生长设备,如中国电子科技集团公司第二研究所自 2008 年研制出首台 SiC 单晶生长炉以来,经四代改进提升,已实现批量生产 300 余台(图 3),满足 150 mm 碳化硅单晶生长要求,第五代(200 mm)生长炉目前已经试生产。同时,近年来北方华创、晶盛机电等专业设备商推出的 SiC 单晶生长设备也已实现批量销售,有力支撑了国内 SiC 材料产业的发展壮大。



图3 国产 SiC 单晶生长设备

但总体而言,目前国内 SiC 衬底片在缺陷控制、成品率等方面与美国 Cree 等国际领先厂家水平还存在明显差距,质量、产能尚不能满足中国高速发展的第三代半导体产业对于关键衬底材料的自主供应要求,特别是应用于 GaN 射频器件的高纯半绝缘 SiC 衬底供应能力亟需加强。随着近一两

年国内第三代半导体产业规模不断提升,国产装备在大批量应用中有望持续提升核心技术与工艺性能,促进中国 SiC 材料实现完全自主。

3.2 MOCVD 设备

MOCVD 设备主要用于 GaN 外延结构生长,是 GaN 器件制造的核心设备,其发展很大程度上得益于以 GaN-LED 为主的半导体照明产业的大规模产业化。MOCVD 设备两大国际厂商为德国 Aixtron 和美国 Veeco,中国曾经通过进口大量 MOCVD 以促进 LED 产业快速发展。而经过多年的自主研发和持续升级,以中微半导体(深圳)股份有限公司为代表的国内厂商已实现 GaN-MOCVD 设备的国产化和产业化,并在国内市场份额持续扩大,成为目前 LED 生产线的主流应用设备,并向 Micro-LED、GaN 功率器件等领域发展。

随着 GaN 器件种类的不断丰富,MOCVD 设备针对不同的器件应用已呈现明显的细分特点,例如用于蓝光 LED 制造的 MOCVD 具备多腔、大产能特点;针对紫外光电器件制造的 MOCVD 具备高温特点;针对 GaN 功率电子特别是 Si 基 GaN 器件的 MOCVD 须具备大尺寸(200 mm)能力。目前在大尺寸 Si 基 GaN 外延生长方面德国 Aixtron 的 MOCVD 设备仍然具备一定优势,该领域国产设备有待进一步提升。

3.3 SiC 外延生长炉

SiC 外延生长一般采用超高温 CVD 方式,在 1600℃以上高温下进行化学气相沉积生长 SiC 外延层,而 SiC 器件的芯片结构都在该外延层上进行加工制作。SiC 外延生长炉目前国际上主要生产厂家分别为意大利 LPE 公司、德国 Aixtron 公司和日本 Nuflare 公司,其代表机型分别为 PE106/108、G5WW 和 EPIREVOTM S6,分别代表水平单片式、水平多片式和垂直单片式路线^[17]。水平单片式设备在目前 SiC 外延生产中应用最为广泛,但也存在因反应室反应物沉积引起的掉落物缺陷控制困难、维护周期较短等问题。反应室反应物的在线清洗技术开发^[18-19]、垂直式反应室路线^[20]均有望突破上述问题,特别是垂直式反应室因较长的反应室维护周期、低缺陷控制等优势有可能成为未来 SiC 外延

片大批量生产的主流方式。

国内在SiC外延生长炉方面的基础比较薄弱,长期以来国内SiC外延生长技术和产业的发展全部依赖进口设备,成为产业链较大隐患。中国电子科技集团公司第四十八研究所虽然已研制出首代生产型SiC外延生长炉工程样机(图4),但仅支持100 mm多片工艺,在大尺寸兼容性、缺陷与均匀性控制、一致性等方面与同期进口设备水平存在较大差距,难以满足实际生产应用要求,因此SiC外延生长炉成为第三代半导体装备自主化进程中的突出短板。近一年来,国内已开展相关攻关研制,有望在未来一两年内突破应用,实现水平单片式设备国产化,但面向垂直反应室结构的SiC外延设备开发尚存在电阻多区超高温加热、边缘机械驱动载片盘高速旋转等诸多基础难点问题需要攻关。SiC外延生长炉国产化进程中的原始创新培养、专利规避与自主专利布局等方面也需要重点关注。



图4 国产SiC外延生长炉工程样机

3.4 高温高能离子注入机

高温高能离子注入机解决SiC器件制造中的p型掺杂问题,是调控SiC器件电学性能的关键设备。国际上SiC离子注入机主要生产厂家为日本ULVAC公司和NISSIN公司,其代表性机型分别为IH-860P SiC和IMPHEAT[®],其中ULVAC公司的IH-860系列SiC离子注入机已经在全球出货超过100台套,是行业应用的主流机型。国内中国电子科技集团公司第四十八研究所于2015年推出首台

SiC离子注入机,通过在产线应用中的持续改进基本满足SiC器件生产要求,并于2019年推出第二代全自动机型(图5),Al³⁺注入能量达到800 keV,注入温度达到600℃,同时可实现大角度、多方位注入,满足侧墙、台阶等复杂结构工艺。第二代SiC离子注入机在能量、温度、束流、均匀性等技术能力以及设备功能、产能等方面已实现与国际主流设备的完全对标,在长期稳定性和可靠性方面尚有待在不断提升。



图5 国产SiC高温高能离子注入机

目前国产SiC离子注入机已占据一定国内市场,对SiC器件制造的自主发展起到了显著支撑作用,有望在后续产业发展中进一步提升设备技术性能,扩大市场占有率。

3.5 SiC高温激活炉

SiC高温激活炉用于SiC离子注入后的高温退火激活工艺,修复离子注入晶格损伤及解决注入离子的激活问题,具备高达2000℃以上的超高温特点,且对快速升/降温能力和腔体洁净度要求高。国际上提供SiC高温激活炉的设备厂商主要有德国Centrotherm、日本东横化学(TOYOKO)和ULVAC,其中Centrotherm公司的Activator 150-50机型市场占有率最高,其采用无金属加热设计技术和定制工艺炉管,最高工艺温度达2050℃,可批量处理50~150 mm SiC晶圆,最大单批产能达到50片;而日本TOYOKO的Ailesic-2000机型采用金属电阻加热方式,相对具有更高的升温速率,但也存在引入金属污染的风险。

国内中国电子科技集团公司第四十八研究所

研制的SiC高温激活炉已经有多台实现生产应用,并发展到第二代全自动机型(图6),最高温度达到2000℃,最大单批产能达到50片,主要技术性能基本达到国际主流水平。但相对主流进口机型,国产设备产线运行的可信数据积累比较有限,在效率、污染控制、高温可靠性等方面尚有较大的提升空间。



图6 国产全自动SiC高温激活炉

3.6 SiC高温氧化炉

SiC高温氧化炉是专用于SiC栅氧层制备的关键工艺设备。SiC器件由二极管向MOSFET的技术发展中,高质量低界面态密度的栅氧化层制备技术成为关键^[21]。立式结构的SiC高温氧化炉是当前SiC MOSFET器件产品制造中栅氧工艺采用的主流设备,具备高温热氧化、氮氧气氛退火、湿氧处理、多片处理等功能特点。SiC高温氧化炉目前主要由国外主导,设备厂商包括德国Centrotherm、日本东横化学和日本东洋(TOYO),主流机型为德国Centrotherm的Oxidation 150-50和TOYOKO的Aile-sic-1400/1700,占据了90%以上市场。国内SiC器件制造企业为缩短技术差距、迅速提升芯片制造水平,均采用进口成熟设备。

国内SiC高温氧化炉研制单位主要有中国电子科技集团公司第四十八研究所、北方华创等,其中中国电子科技集团公司第四十八研究所已推出样机(图7),并开展了一定的验证,但尚未实现批

量生产应用,缺乏可信工艺数据积累。设备性能指标方面,受制于基础材料、零部件特别是高温炉管材料的影响,国产设备在高温性能、污染控制和可靠性等方面尚存在差距,此外在自动化水平、制造一致性等方面亟需提升。SiC高温氧化炉的国产化推进在持续提升设备性能同时,还需协同突破炉管等关键部件材料的自主供应问题。



图7 国产SiC高温氧化炉

4 中国第三代半导体装备领域发展建议

4.1 以企业为主体,产学研用协同创新

继续深入贯彻以需求为牵引、以企业为主体、产学研用紧密合作的发展理念。建立研发资金持续投入机制,在国家重大科技项目的持续支持下,统筹利用国家、企业、社会资本等多方面资金,深度融合创新链、产业链、资金链,不断提高半导体设备国产化水平和供应链协同能力。

4.2 着力装备共性技术,培育自主零部件配套体系

重点突破温场/流场设计、运动控制、机器视觉等半导体装备共性技术,以及半导体装备基础、通用、专用零部件。顶层制定协同发展政策,设备单位与零部件单位协同攻关,夯实半导体装备制造业发展基础。

4.3 加强创新人才培养,增强产业发展后劲

加强创新人才、创新团队培养与建设,调动高

校、科研院所和企业积极性,形成产学研用联合人才培养机制。倡导建立科技人才的激励机制,培养和吸引高素质、复合型人才到科研、生产第一线。鼓励有创新实践经验的企业家和企业科技人才到高等学校和科研院所兼职。积极引进产业发展所需的高层次经营管理人才和技术人才。

5 结论

当前中国第三代半导体产业呈现出应用百花齐放、创新层出不穷、政策鼎力支持的良好发展态势,为相关制造装备的发展提供了良好的环境与土壤,更对国产制造装备的保障能力提出了更高的要求。中国已经形成了较为完整的第三代半导体制造装备技术储备和产业布局,在部分领域逐渐接近国际先进水平。但同时必须承认,中国在半导体制造装备领域的产业积累依然薄弱,装备工程化水平普遍较低,对产业的支撑力度严重不足,仍然需要不断推进技术创新、应用验证和产业推广,不断加大政策支持和产业链协同,营造国产装备良性发展生态。“宝剑锋从磨砺出,梅花香自苦寒来”,通过全产业链的努力,第三代半导体制造装备国产化的春天必将加快到来。

参考文献(References)

- [1] 李晋闽. 新旧动能转换引领第三代半导体产业创新发展[J]. 中国科技产业, 2018(1): 54-55.
- [2] International Roadmap For Devices and Systems[EB/OL]. [2020-07-30]. <https://irds.ieee.org>.
- [3] 周哲, 付丙磊, 王栋, 等. 集成电路制造工艺技术现状与发展趋势[J]. 电子工业专用设备, 2017(3): 34-38.
- [4] Smith S A, Wolden C A, Bremser M D, et al. High rate and selective etching of GaN, AlGaN, and AlN using an inductively coupled plasma[J]. Applied Physics Letters, 1997, 71(25): 3631-3633.
- [5] Takahashi N, Itoi S, Nakashima Y, et al. High temperature ion implanter for SiC and Si devices[C]//International Workshop on Junction Technology. Piscataway, NJ: IEEE, 2015.
- [6] Chung G Y, Tin C C, Williams J R, et al. Improved inversion channel mobility for 4H-SiC MOSFETs following high temperature anneals in nitric oxide[J]. IEEE Electron Device Letters, 2001, 22(4): 176-178.
- [7] Dutta G, DasGupta N, DasGupta A. Low-temperature ICP-CVD SiN_x as gate dielectric for GaN-based MIS-HEMTs[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2016, 63(12): 4693-4701.
- [8] Jose M. A survey of wide bandgap power semiconductor devices[J]. IEEE Transactions on Powerelectronics, 2014, 29(5): 2155-2163.
- [9] Tsunenobu K. Material science and device physics in SiC technology for high-voltage power devices[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2015, 54: 040103.
- [10] Nakamura S, Mukai T, Senoh M. Si- and Ge-doped GaN films grown with GaN buffer layers[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1992, 31(2): 883.
- [11] Oshima M, Mori D, Takigawa A, et al. Photoelectron nano-spectroscopy of Reactive Ion Etching-induced damages to the trench sidewalls and bottoms of 4H-SiC trench-MOSFETs[J]. E-Journal of Surface Science and Nanotechnology, 2018, 16: 257-261.
- [12] Goh J, Kim K. Low on-resistance 4H-SiC UMOFET with local floating superjunction[J]. Journal of Computational Electronics, 2019, 19(1): 234-241.
- [13] Chen K J, Haeberlen O, Lidow A. GaN-on-Si power technology: Devices and applications[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2017, 64(3): 779-795.
- [14] Mannequin C, Vallee C, Akimoto K, et al. Comparative study of two atomic layer etching processes for GaN[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 2020, 38(3): 032602.
- [15] Wang H C, Lumbantoruan F J, Hsieh T, et al. High-performance LPCVD-SiN_x/InAlGa_{0.1}N/GaN MIS-HEMTs with 850-V 0.98-m Ω·cm² for power device applications[J]. IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2018, 6(1): 1136-1141.
- [16] Hofmann D, Bickermann M, Eckstein R, et al. Sublimation growth of silicon carbide bulk crystals: Experimental and theoretical studies on defect formation and growth rate augmentation[J]. Journal of Crystal Growth, 1999(suppl 198/199): 1005-1010.
- [17] Hidekazu T, Isaho K, Tetsuya M, et al. Recent advances in 4H-SiC epitaxy for high-voltage power devices[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2018, 78: 2-12.
- [18] Yoshiaki D, Shigeaki I, Takehiko K. Impacts of surface

- C/Si ratio on in-wafer uniformity and defect density of 4H-SiC homo-epitaxial films grown by high-speed wafer rotation vertical CVD[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2019, 58(SB): SBBK06.
- [19] Kohei S, Keisuke K, Hitoshi H. Quick cleaning process for silicon carbide chemical vapor deposition reactor[J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2017, 6(8): 526-530.
- [20] Kosuke M, Kohei S, Hitoshi H. Repetition of in situ cleaning using chlorine trifluoride gas for silicon carbide epitaxial reactor[J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2016, 5(2): 12-15.
- [21] Fabrizio R, Patrick F, Giuseppe G, et al. Emerging trends in wide band gap semiconductors (SiC and GaN) technology for power devices[J]. Microelectronic Engineering, 2018(187/188): 66-77.

Promote the domestication of the third-generation semiconductor equipment to embrace the dawn of semiconductors and consolidate the new infrastructure

WANG Zhiyue¹, GONG Xiaoliang^{1,2}, FU Binglei³

1. The CETC Electronic Equipment Group Co., Ltd., Beijing 100070, China
2. The 48th Institute of CETC, Changsha 410111, China
3. Huajin Holding Group Co., Ltd., Beijing 100000, China

Abstract The third-generation semiconductors, with the SiC and the GaN as the representatives, are widely used in the new infrastructure like the 5G base station and the EV charging point. The manufacturing process of the third-generation semiconductor requires high temperature, high energy and low damage, and the related equipment thus has to be modified. The requirements of the process and the related equipment for the third-generation semiconductor are presented. This paper also reviews the domestication of the third-generation semiconductor equipment and offer suggestions for the future, such as we should take the enterprise as the main body and make the collaborative innovation in production, teaching, research and application; focus on equipping the technology in common uses and cultivating the independent part supporting system; strengthen the cultivation of the innovative talents and enhance the potential of the industrial development.

Keywords third-generation semiconductor; equipment; semiconductor industry ●



(责任编辑 王志敏)