石墨基座设计对4H-SiC掺杂浓度均匀性的调控与仿真模拟研究

刘英斌[1],张国良[1],李田田[2*]
(1.河北普兴电子科技股份有限公司,河北 石家庄 050200;
2.河北科技大学材料科学与工程学院,河北 石家庄 050018)

摘要:针对4H-SiC在化学气相沉积法外延生长过程中N掺杂浓度均匀性控制的难点,系统研究了生长过程中石墨基座形状与旋转速度对掺杂分布的影响机制。通过建立二维气流模型并开展实验验证,分析了不同基座形状与旋转条件对反应腔内气流场及温度场的调控规律。结果表明,采用中间凹形石墨基座可有效引导气流、减小径向温差;而当基座转速控制在30 r/min时,能够优化反应气体的混合与输运过程,有效抑制因自然对流引起的浓度不均匀现象。在优化后的工艺条件下,实现了良好的掺杂均匀性(约为3.35%),为高性能SiC外延层的可控生长提供了重要工艺依据。

关键词:化学气相沉积;碳化硅;石墨旋转速度;石墨形状;掺杂浓度均匀性
中图分类号:TQ163.4 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-4320(2026)11-0208-06
DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.11.034

Modeling and controlling N doping concentration uniformity in 4H-SiC by graphite susceptor design

LIU Ying-bin[1], *ZHANG Guo-liang*[1], *LI Tian-tian*[2*]
(1.Hebei Poshing Electronics Technology Co., Ltd., Shijiazhuang 050200, China; 2.School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: This study addresses the challenges in controlling the uniformity of N doping concentration during the chemical vapor deposition (CVD) epitaxial growth of 4H-SiC, systematically investigating the influence of graphite susceptor shape and rotation speed on the doping distribution mechanism. By establishing a two-dimensional gas flow model and conducting experimental validation, the regulatory effects of different susceptor configurations and rotation conditions on the flow and temperature fields within the reaction chamber were analyzed. The results indicate that the use of a concave graphite susceptor effectively guides gas flow and reduces radial temperature differences; when the susceptor rotation speed is controlled at 30 r/min, the mixing and transport processes of the reaction gases are optimized, effectively suppressing concentration non-uniformity caused by natural convection. Under the optimized process conditions, good doping uniformity (about 3.35%) was achieved, providing important process guidance for the controllable growth of high-performance SiC epitaxial layers.

Key words: chemical vapor deposition; SiC; graphite susceptor shape; rotation speed of graphite; doping concentration uniformity

具有六方结构的4H-碳化硅(4H-SiC)作为第三代宽禁带半导体材料的代表,因高临界击穿电场、高电子饱和漂移速率和优异的导热性能,成为制造高温、高频及大功率器件的理想材料[1-3]。高质量4H-SiC外延层薄膜的制备是其应用的核心前提[4-6]。在众多制备方法中,化学气相沉积(CVD)技术因能够精确控制外延层的厚度、N掺杂浓度(以下简称掺杂浓度)和晶体质量,已成为实现高性能4H-SiC同质外延生长的主流和关键技术[7-9]。其中,实现掺杂浓度在衬底表面乃至整个外延层厚度范围内的优异均匀性至关重要,直接决定了功率器件的关键性能参数与良率[10]。当掺杂浓度在横向上不均匀时,会导致器件单元间的阈值电压和导通电阻发生波动,引发局部电流集中和过早击穿,严重制约器件的阻断能力和可靠性;而纵向浓度分布的失控则难以精确控制耗尽区的展宽,影响器件的耐

收稿日期:2025-12-12;**修回日期**:2026-09-09
基金项目:石家庄市产学研合作项目重大专项(241130547A)
作者简介:刘英斌(1972-),男,硕士,工程师,研究方向为半导体外延材料与技术,yingbin_liu123@163.com;李田田(1990-),女,博士,副教授,研究方向为涂层材料、半导体外延材料与技术,通讯联系人,litiantian669@163.com。

压等级。因此,CVD 工艺中,实现 4H-SiC 外延层中掺杂浓度均匀性的精密控制是高端产业化应用的核心前提与挑战之一。

在 CVD 工艺中,掺杂浓度的均匀性受生长温度、气流量、碳/硅比、石墨旋转速度及石墨形状等多种因素影响[11-14]。石墨基座形状与旋转速度是调控均匀性的 2 个关键因素,它们通过直接影响反应腔内的气流分布发挥作用[15-16]。具体而言,石墨基座的旋转速度是扰动流场、打破自然对流的关键变量;而其形状(如倾斜角度或曲面)则能预先引导气流,影响温度场分布,进而影响浓度均匀性。遗憾的是,目前研究对这两者协同作用的关键影响尚缺乏深入探讨。

为此,本研究结合仿真模拟与实验验证,系统分析了石墨基座形状与旋转速度对气流场及最终掺杂浓度均匀性的影响规律。仿真模拟结果表明,具有中间凹型的石墨结构可以引导气流场的均匀分布,使得石墨基座上沿的温度场均匀分布;在确定凹型石墨基座的基础上,旋转速度可以进一步优化反应气体的混合与输运过程,有效抑制因自然对流引起的浓度不均匀现象,有效改善掺杂浓度均匀性。最终测试结果表明,当基座转速控制在 30 r/min 时,在 1 620℃下掺杂浓度均匀性最低可达 3.35%,且浓度均匀性的改善也经过了工业化生产验证,为 CVD 外延生长高质量 4H-SiC 提供了理论基础。

1　材料与试剂

1.1　材料

石墨,购买于内蒙古京航特碳科技有限公司。6 英寸 SiC 衬底,购买于山西烁科晶体有限公司。

1.2　仪器及试剂

水平热壁式反应炉,国内生产外延炉;SSM495 型汞探针浓度测试仪,神创智能装备(苏州)有限公司生产。纯度为 99.999 9%的氢气、纯度为 99.999 9%的三氯氢硅、纯度为 99.999 9%的乙烯、纯度为 99.999 9%的氮气。

2　实验方法

2.1　仿真模拟

在气流速率场模拟流程中,为实现对反应腔各工艺条件模拟的准确性,采用 CAD 软件对 SiC 反应腔的结构特征予以合理简化,该生长腔的二维模型基本结构如图 1(a)所示。由于 SiC 外延片的厚度薄,垂直碳化硅外延片平面方向上的气流变化对外延片的浓度均匀性影响可以忽略,因此以二维气流速率场模型,采用 COMSOL 软件开展对 SiC 外延生长过程中的气流与温度场分布模拟。反应器中气体视为理想气体,气体流动状态为层流。数值模拟使用的控制方程如下[17-18]:

$$\rho(u\nabla)u = \nabla(-pl + K) + F \tag{1}$$

$$\rho\nabla u = 0 \tag{2}$$

式中,ρ 为流体的质量密度,g/L;u 为流体速度,m/s;p 为流体的静压力,Pa;l 为二阶单位张量;K 为偏应力张量;F 为体积力密度,N/m^3。

入口方程为[19]:

$$\int\partial\Omega(\rho/\rho_{st})(u\cdot n)d_{bc}dS = Q_{sccm}\cdot\rho_{st} = M_n/V_m \tag{3}$$

出口方程为[19]:

$$n^T(-pl + K)n = -\hat{p}_0 \tag{4}$$

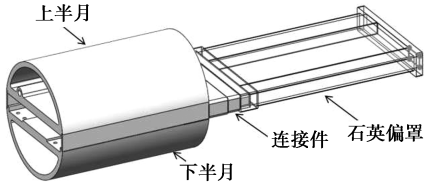
式中,Ω 为积分区域;Q_{sccm} 为气体流量,sccm;ρ_{st} 为稳态密度,g/L;M_n 为气体的摩尔质量,g/mol;V_m 为气体的摩尔体积,L/mol;d_{bc} 为微小面积元素;n 为速度的法向量;n^T 为法向量 n 的转置。

在数值模型求解过程中,设定边界条件如下:气体入口采用质量流量入口或法向速率场入口,按照气体在 3 个入口不同位置进行一定分配,入口温度条件为恒温。气体出口采用静压力,按公式(5)进行计算[20-21]:

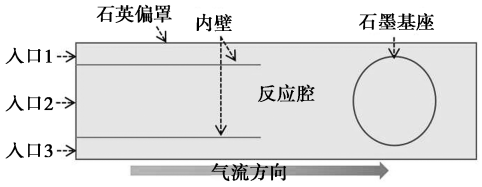
$$\partial P/\partial n = 0 \tag{5}$$

2.2　实验工艺与参数

本研究主要采用水平热壁式反应炉为 SiC 生长炉,炉腔示意图如图 1 所示。将 SiC 衬底置于可旋转石墨加热盘表面,采用三氯氢硅(TCS)作为硅源,乙烯(C_2H_4)作为碳源,氮气(N_2)作为掺杂源,与载气 H_2(固定载气流量为 100 sccm)均匀混合,通过进



(a)PLE106 型水平热壁反应炉腔体几何结构



(b)腔体内气流方向和石墨基座平面图

图 1　PLE106 型水平热壁反应炉腔体及内部气流方向和石墨基座示意图

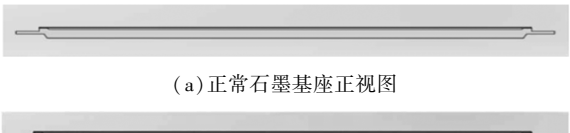
气口进入反应器,同时控制 C/Si 比为 1.1,生长温度为 1 620℃,生长时间为 2 h。通过控制石墨基座的形状(标准平面石墨基座和具有中间凹形石墨基座)和石墨旋转速度(改变气旋流量)进行了实验对比,主要探究了旋转速度 0、3、6、30、60 r/min 下的掺杂浓度变化。其中,掺杂浓度均匀性计算方式为标准偏差与平均值的比值(值越低,均匀性越好)。

3 结果与分析

3.1 基座形状对温度场变化的仿真模拟

在高温外延生长条件下,反应腔的几何结构较为复杂。其中,石墨基座的形状(如平面、凹面)会影响其与加热器之间的辐射热耦合,从而导致 SiC 晶圆表面存在不同的气流场和温度梯度。本研究选取标准平面石墨基座与中间凹形石墨基座为研究对象[图 2(a)、(b)],采用有限元模拟方法对二者表面温度场分布进行仿真模拟。图 2(c)、(d)所示数值模拟结果,可以看出 2 种石墨形状构型呈现明显不同的温度梯度变化。平面基座在碳化硅外延生长区形成对称型温度场分布,其轴向温度梯度较高。中间凹形基座通过几何约束重构热传导路径,使径向温度梯度降低。这主要是因为基座的曲面结构起到导流作用,使气流更平顺、更稳定地流过晶圆表面,减少涡流的产生。这种稳定的流场有助于形成一个厚度更均匀的边界层,从而确保了反应物和热量的输送在 SiC 晶圆各处保持一致,间接促进温度场的均匀性。

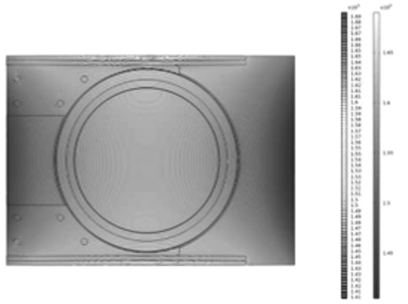
随后在设定实验参数下对不同石墨形状基座上生长 4H-SiC 时的温度场进一步仿真模拟。如图 2(e)、(f)所示,标准基座条件下生长的 4H-SiC,在径向上中心温度约 1 601℃,边缘温度约为 1 622℃,温度差为 21℃;而中间凹形石墨基座条件下生长的 4H-SiC,径向上温差较小,约为 19℃(中心区域温度约为 1 601℃,边缘区域温度约为 1 620℃)。另外,横向上中间凹形石墨基座的 4H-SiC 具有更加均匀的温度场分布,这表明,中间凹形基座使中心区等温面曲率半径增加,有效降低了局部热流密度,使得径向温差缩减促使边界层扩散系数提升[22],增强掺杂 N 原子的横向输运均匀性;其次,边缘温度波动系数下降可以通过抑制热迁移效应,使该区域掺杂浓度下降。以上结果表明,采用中间凹型结构石墨可以引导气流,优化生长腔室乃至 SiC 晶圆表面的气流场和温度场分布。



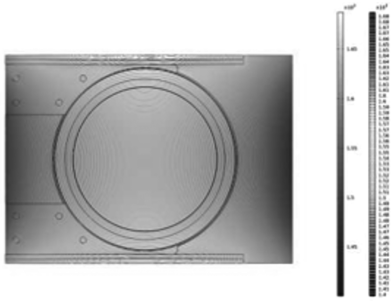
(a)正常石墨基座正视图



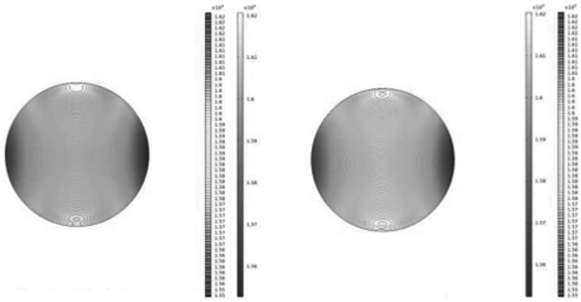
(b)凹型石墨基座正视图



(c)正常基座温度场模拟



(d)凹型基座温度场模拟



(e)正常石墨基座上 4H-SiC 外延片温度场模拟　(f)凹型石墨基座上 4H-SiC 外延片温度场模拟

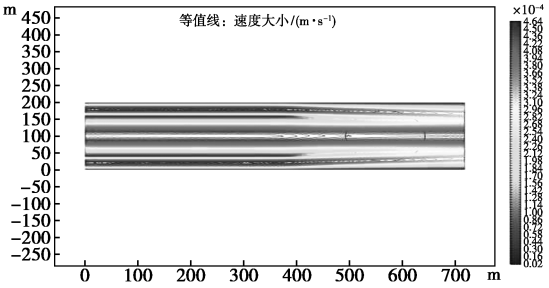
图 2 石墨基座几何形状及温度场模拟图

3.2 基座旋转速度对温度场变化仿真模拟的影响

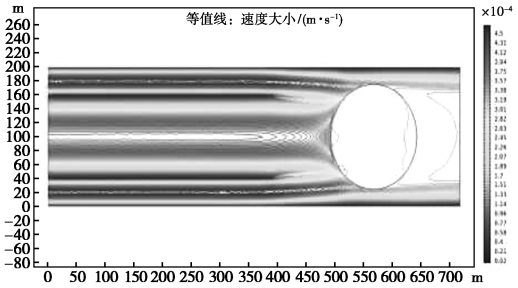
CVD 反应室中可能存在的温度梯度或相对静止的热边界层,阻碍了热量从基座向晶圆的有效传递以及气流的均匀输送,导致 SiC 晶圆表面气流场/温度场分布不均,影响外延片掺杂浓度均匀性。将静止的石墨加热基座进行一定速度的旋转有望改善 SiC 晶圆表面的气流场/温度场分布。本研究首先采用仿真模拟的方法对凹型石墨基座旋转速度为 0 r/min(静止的)时的腔室进行了气流场分布研究[图 3(a)]。由流场分布图可见,反应腔室两侧壁面附近气流流速相对缓慢,并沿壁面向内逐渐加速;

当气流从两侧向中心内壁面汇聚时,其速率仍处于较低水平;进入中间腔体后,气流进一步加速,最终在腔体中心区域形成具有明显差异的气流场分布,且石墨基座表面气流场分布也存在明显不均匀性。这主要是因为靠近壁面处的温度梯度会引发不稳定、不对称的自然对流,并有可能形成涡流[23],影响气流场在整个反应腔室内的均匀分布。

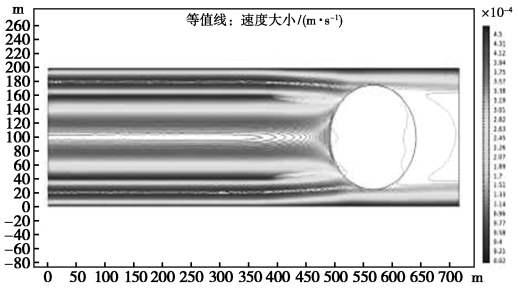
随后,本研究将反应腔内凹型石墨基座的旋转速率分别设定为 3、6、30、60 r/min(调节气旋流量实现)进行气流场分布模拟分析。对比发现,当基座开始旋转且转速较低时[图 3(b)],托盘上方气流速度场的均匀性得到一定改善,但是气流场分布仍呈梯度,存在滞留区和耗尽区,导致浓度均匀性差。随着转速进一步增加(从 6 r/min 提高至 30 r/min),气流沿既定方向流经基座时,仅在尾部区域出现局部气流结构与整体流场的差异,而基座大部分区域的气流速度分布趋于均匀[图 3(c)、(d)]。当旋转速率达到 60 r/min 时,如图 3(e)所示,中心区域的流速场变化不再明显,甚至进一步提高转速可能会引入过大的湍流波动,改变局部流场均匀性。



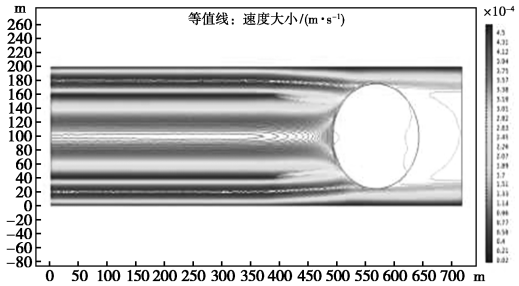
(a)0 r/min 下气流场模拟



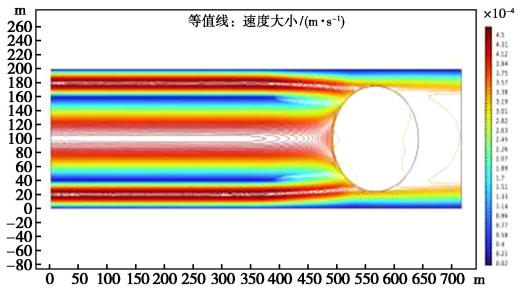
(b)3 r/min 下气流场模拟



(c)6 r/min 下气流场模拟



(d)30 r/min 下气流场模拟



(e)60 r/min 下气流场模拟

图 3　不同转速条件下的气流场仿真模拟

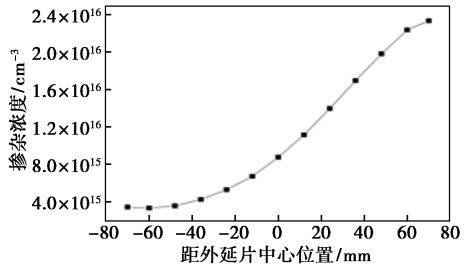
可见,控制凹型石墨基座旋转速度为 30 r/min 时,反应气体和掺杂气体被充分混合、均匀输送,质量边界层薄而均匀,呈现出最优的气流场分布。过低的旋转速度出现明显的自然对流主导,而过高的旋转速度又有可能引入新的不均匀模式,二者均会削弱石墨表面气流场的均匀性。

3.3　基座旋转速度对 SiC 外延片掺杂浓度均匀性的影响

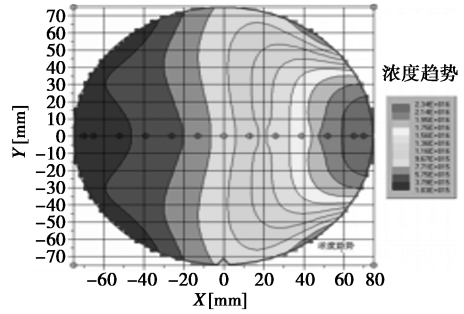
为了验证凹型基座旋转速度对浓度均匀性的影响,探究了不同旋转速度下的浓度分布及 MAPPING 图。当旋转速度为 0 r/min 时,外延片的掺杂浓度沿设备进气流动方向逐渐增高,在进气口端和出气口端,浓度增加稍缓,在中部部位,浓度增加基本呈指数分布,最高为 2.34×10^{16}[图 4(a)]。随后对该条件下 SiC 外延片上不同位置的掺杂浓度进行统计,并绘制了掺杂浓度 MAPPING 图。由图 4(b)可以看出,进气口端浓度低,而出气口端浓度高,纵向面上浓度均匀性较好,与浓度分布曲线保持一致。这主要是因为反应物气体输运不均匀,且 SiC 外延片上的温度梯度较大,导致凹型基座旋转速度为 0 r/min 时,浓度分布均匀性差。

通过改变气悬流量调节石墨旋转速度分别为 6、30、60 r/min,探究了旋转速度对掺杂浓度的影响。图 4(c)所示为不同旋转速率下掺杂浓度随距离的变化曲线。可以看出,当旋转速度为 6 r/min 时,中间区域掺杂浓度最高值为 8.3×10^{15},而在靠近

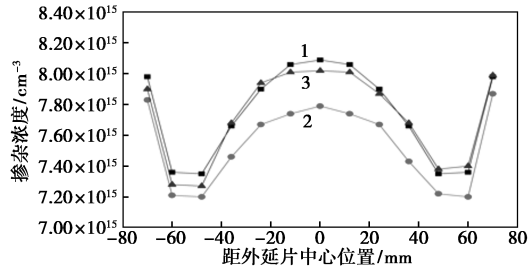
边缘区域较近位置处出现掺杂浓度较小值为 7.4×10^{15},平均掺杂浓度均匀性为 3.95%。提高旋转速率为 30 r/min 时,SiC 外延片表面的掺杂浓度最高值和最低值分别为 7.8×10^{15} 和 7.8×10^{15},掺杂浓度值均匀性为 3.35%。而旋转速率提升至更快的 60 r/min 时,碳化硅外延片的表面浓度值又会提高,且浓度均匀性降低(3.76%)。值得注意的是,在石墨基座旋转的条件下,浓度分布最均匀的位置均为 SiC 外延片中间区域。



(a)0 r/min 条件下 SiC 外延片上浓度分布



(b)0 r/min 条件下 SiC 外延片浓度 MAPPING 图



1—6 r/min;2—30 r/min;3—60 r/min

(c)不同转速下外延片上浓度分布统计图

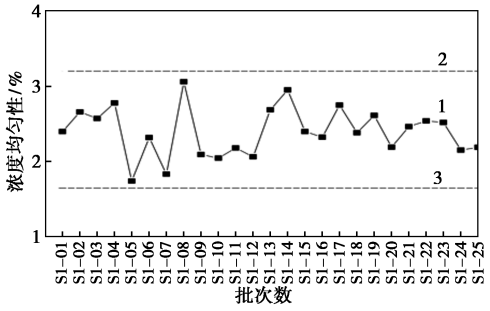
图 4 不同转速下外延片上浓度分布统计

由此可以得出结论:提高旋转速率能够提升整个外延层的浓度均匀性,减少气流入口/出口处因气流不均匀引起的浓度均匀性差的问题。这主要是因为合适的旋转速度能够均匀混合反应物气体和掺杂气体,并将混合气体从主气流“泵送”并均匀地扫过整个 SiC 晶圆表面[24],同时将副产物及时带走,极大地削弱了入口/出口效应,确保了晶圆各处接触的气体成分高度一致。这一实验结果与模拟气流场均匀性表现结果一致。

3.4 浓度均匀性工业化验证

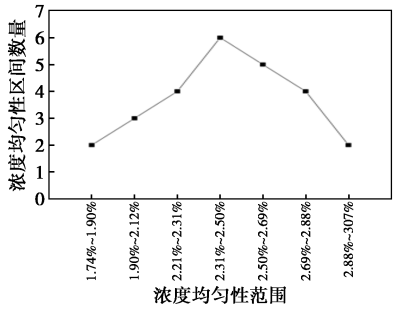
通过以上研究可知,在生长工艺一定条件下,控制石墨基座为中间凹形,且旋转速度为 30 r/min 时所生产的 SiC 外延片浓度均匀性良好。基于此,对批量生产的 SiC 外延片浓度均匀性展开分析。图 5(a)为连续生产 26 批次后,每批次随机取样 1 片进行的浓度均匀性统计图。可以清晰看到,在批量生产过程中,浓度均匀性存在一定程度的波动。经分析,该现象与气流变化存在一定联系。在 SiC 生长过程中,每一炉次的气流都会产生细微变动,同时,掺杂情况也会因系统沉积的碳化硅等因素的影响而改变,这是碳化硅生长时源气体的分布造成影响。此外,仍然存在的温区差异以及凹型石墨结构的上半月反射率的变化,也会导致不同程度的浓度均匀性变化。

图 5(b)展示了连续生产中浓度均匀性的分布曲线图。从图中能够看出,通过对石墨基座旋转速度和形状进行优化,连续生产碳化硅外延片的浓度均匀性基本呈现正态分布。其中,浓度均匀性在 2.31%~2.5%的占比最高,满足了实际量产的要求。



1—浓度均匀性;2—上限;3—下限

(a)不同生产批次下浓度均匀性平均分布图



(b)符合高斯分布的浓度均匀性区间

图 5 连续生产条件下的浓度均匀性统计

4 结论

本研究系统探究了 CVD 外延生长 4H-SiC 过

程中石墨基座的形状与旋转速度对 N 掺杂浓度均匀性的影响机制,并通过仿真模拟与实验验证相结合的方法揭示了其内在机理。研究结果表明,具有中间凹形结构石墨基座能够有效引导反应腔内气流分布,降低径向温度梯度,改善热场均匀性,从而提升掺杂气源在 SiC 表面的横向一致性;同时,基座的旋转速度对气流场的扰动具有关键作用,适当的转速(30 r/min)可显著削弱自然对流导致的流场不均匀性,减少滞留区与耗尽区,增强反应气体的混合与输送效率,进而优化掺杂浓度的分布。在凹形基座和固定 30 r/min 旋转速度下,SiC 外延片的 N 掺杂浓度均匀性可提升至 3.35%,并在连续批量生产中表现出良好的重复性与稳定性,满足工业化生产要求。本研究明确了石墨基座形状与旋转速度的协同调控是实现高均匀性 N 掺杂的关键,为 CVD 工艺参数的优化提供了理论依据与实验支撑。

展望未来,尽管本研究在石墨基座结构对浓度均匀性的影响方面取得了重要进展,但在实际产业化应用中仍存在若干待深入探索的问题。例如,反应腔内气流的瞬态波动、温区控制的细微变化,以及石墨材料在长期高温环境下的形变与表面特性演变等因素,均可能引起浓度均匀性的批次间波动。此外,当前研究主要聚焦于二维流场模拟,未来可进一步开展三维多物理场耦合仿真,更真实地反映复杂腔体结构下的气体流动、热量传递与化学反应过程。生长工艺参数的变动也会影响浓度均匀性,应在实际生产中进行综合考虑。最后,探索新型基座材料与结构设计,如多区控温石墨基座或复合涂层基座,也有望实现更优的掺杂均匀性,推动 SiC 基功率器件向更高性能与更可靠方向发展。

参考文献

[1] Azam M, Wang J, Su W. Advances in SiC growth mechanisms and defects control strategies enhanced by machine learning perspective [J]. Materials Today Communications, 2025: 113995.

[2] Liu J, Chen Z, Chai P, *et al*. Effects of deposition temperature on microstructure and electrical resistivity of intrinsic CVD-SiC [J]. Ceramics International, 2025, 51(3): 3925-3933.

[3] Wang X, Li H, Liu H, *et al*. Growth and defect formation mechanism of CVD-prepared SiC coatings based on cross-scale simulation [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 479: 147652.

[4] Pennachio D J, Hajzus J R, Myers-Ward R L. Exploring SiC CVD growth parameters compatible with remote epitaxy [J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2025, 43(2): 022801.

[5] Zheng C, Li H, Li H, *et al*. Growth mechanism of a batch deposited SiC coating on large-size graphite plates based on multi-scale simulation [J]. Journal of Crystal Growth, 2024, 646: 127851.

[6] 熊瑞,赵志飞,王翼,等.碳面 4H-SiC 衬底高质量同质外延生长[J].固体电子学研究与进展,2025,45(5):20-25.

[7] Luo Y, Liu K, Yuan H, *et al*. Experimental demonstration and mechanism study of single-event gate leakage current in 4H-SiC power MOSFET with top oxide and double P-well structures [J]. Chinese Physics B, 2025, 34(9): 097701.

[8] Yao J, Yang Z, Dai Y, *et al*. 4H-SiC superjunction MOSFET with integrated high-K gate dielectric and split gate [J]. Journal of Semiconductors, 2025, 46(8): 082501.

[9] Qu H, Xu W Z, Zhao J Z, *et al*. 4H-SiC-based soft X-ray single photon detector with linear photon energy response [J]. Chinese Optics Letters, 2025, 23(3): 57-61.

[10] Wagner G, Doerschel J, Gerlitzke A. Surface preparation of 4H-SiC substrates for hot-wall CVD of SiC layers [J]. Applied Surface Science, 2001, 184(1/2/3/4): 55-59.

[11] Ayalew T. SiC semiconductor devices technology: Modeling and simulation [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2004, 51(12): 1961-1969.

[12] Karhu R, Sveinbjörnsson E Ö, Magnusson B, *et al*. CVD growth and properties of on-axis vanadium doped semi-insulating 4H-SiC epilayers [J]. Journal of Applied Physics, 2019, 125(4): 045702.

[13] 芦伟立,房玉龙,李帅,等.4H-SiC 同质外延材料堆垛层错缺陷的表征与研究[J].标准科学,2025,(S1):359-363.

[14] 谢添乐,李苹,杨宇,等.200 mm SiC 外延炉及同质外延工艺研究[J].电子工业专用设备,2024,53(4):11-16.

[15] 韩跃斌,蒲勇,施建新,等.高速旋转垂直热壁 CVD 外延生长 n 型 4H-SiC 膜的研究[J].人工晶体学报,2023,52(5):918-924.

[16] 张翅腾飞,章嵩,龚若程,等.KCl 溶液结晶辅助表征 4H-SiC 衬底中的微划痕[J].人工晶体学报,2024,53(10):1745-1751.

[17] Kieu H M T, Ngo S I, Lim Y I, *et al*. Optimal susceptor rotation speed in hot-wall horizontal SiC epitaxy using computational fluid dynamics [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2025, 103(4): 1284-1299.

[18] 黄鹤,张玉明,汤晓燕,等.4H-SiC 材料中刃型位错的仿真模拟研究[J].航空计算技术,2011,41(1):57-65.

[19] Nishizawa S I. Numerical modeling of SiC single crystal growth-sublimation and hot-wall epitaxy [J]. Journal of Crystal Growth, 2009, 311(3): 871-874.

[20] Koshka Y, Melnychuk G, Mazzola M S. Two-and three-dimensional simulation of chemical vapor deposition SiC epitaxial growth processes [J]. Journal of Electronic Materials, 2003, 32(5): 448-451.

[21] Ogawa T, Fukumoto K, Machida H, *et al*. CFD simulation of CVD reactors in the CH_3SiCl_3(MTS)/H_2 system using a two-step MTS decomposition and one-step SiC growth models [J]. Heliyon, 2023, 9(4): e14863.

[22] Feng Z C, Lin H H, Xin B, *et al*. Structural characteristics of 3C-SiC thin films grown on Si-face and C-face 4H-SiC substrates by high temperature chemical vapor deposition [J]. Vacuum, 2023, 207: 111643.

[23] Jehad A K, Fidan M, Ünverdi Ö, *et al*. CVD graphene/SiC UV photodetector with enhanced spectral responsivity and response speed [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2023, 355: 114309.

[24] Wang R, Huang Y, Yang D, *et al*. Impurities and defects in 4H silicon carbide [J]. Applied Physics Letters, 2023, 122(18). ■