

# CVD 设备高温静电卡盘温度均匀性影响因素分析

丁衍凯, 赵世柯, 瞿波, 王帅

(北京真空电子技术研究所, 北京 100015)

**摘 要:** 静电卡盘(electrostatic chuck)是一种利用静电吸附力将晶圆吸附在表面,并以热传导为主要控温方式控制晶圆表面温度的半导体工艺设备,在目前的集成电路装备中起到关键作用。温度均匀性(温差)直接影响晶圆成膜质量,是至关重要的指标之一。高温 CVD 工艺环境下针对静电卡盘传热的影响因素进行研究。采用 ANSYS Workbench 建立了 CVD 腔室环境与静电卡盘的热传导模型,分析了在 CVD 工艺环境下不同静电卡盘结构及工程上的误差对于静电卡盘表面温度均匀性的影响,并通过 CVD 腔室对其中一种静电卡盘仿真结果进行实验验证。研究表明:对于该类型静电卡盘,盘体和轴之间的接触结构、加热丝分布对温度场分布具有显著影响,而加热丝倾斜则对温度场分布几乎没有影响;静电卡盘轴材料的导热系数、轴壁厚度、静电卡盘的尺寸对局部温度场分布存在影响。研究内容对于静电卡盘传热理论完善及后续静电卡盘的设计优化具有重要的指导意义。

**关 键 词:** 静电卡盘;热仿真;IC 装备;CVD

**中图分类号:** TN305.7

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-2758(2026)02-0426-09

静电卡盘(ESC)是一种利用静电力吸附来对不同工件进行夹持和固定的工艺装置,因其对吸附对象施力均匀且在真空环境下具备吸附的能力,被广泛应用于半导体及光学领域中。目前,化学气相沉积(CVD)不仅要借助静电卡盘的吸附功能,还需通过静电卡盘中的加热电极对晶圆进行温度控制,以保证晶圆温度均匀,提高成膜质量。

静电卡盘于 20 世纪 70 年代初由 Wardly 等提出,此后国内外对其开展了大量研究。为了探究刻蚀工艺的晶圆表面温度均匀性的影响因素, Samir<sup>[1]</sup>构建了简化二维轴对称热模型,并设计了验证实验。该实验完整地研究了刻蚀工艺下的静电卡盘温度均匀性的影响因素。Lee 等<sup>[2]</sup>分别研究了单区、多区陶瓷加热器对静电卡盘表面温度均匀性的影响,通过改变加热功率对比单区及多区陶瓷加热器表面的温度分布及温差等参数,最终得出多区加热器在径向上产生更均匀温度场的结论。Yoon 等<sup>[3]</sup>分析了静电卡盘与晶圆之间的传热机制,并建立了相应的传热模型,基于该模型得出了调整背吹气压能够提

升静电卡盘温度均匀性的结论。近几年,我国对于静电卡盘热学的系统性研究也开始逐步完善,孙钰淳等<sup>[4]</sup>在静电卡盘和晶圆之间导热机制基础上,提供了静电卡盘与晶圆之间接触热阻的计算方法。冯鹏<sup>[5]</sup>针对 HDPCVD 设备静电吸盘热流进行了研究和仿真,基于计算得出的稳态理论传热模型结合实验平台获取的稳态温度数据,分析了射频功率及氢气压力 2 个因素对温度均匀性的影响。

根据以上对静电卡盘的研究可以看出,对静电卡盘温度均匀性影响因素的研究是半导体晶圆工艺的重要研究方向。本文主要针对 CVD 设备中高温静电卡盘本身结构对温度均匀性的影响,基于三维静电卡盘传热模型分析并指出静电卡盘结构当中各因素对温度分布的影响,为后续静电卡盘结构设计和加工提供理论指导。

## 1 静电卡盘传热原理及模型建立

### 1.1 静电卡盘传热原理

在 CVD 设备高温静电卡盘的使用过程中,热量传递的主要方式是热传导和热辐射。

热传导通常被简称为导热。在本文静电卡盘的

研究中,在导热部分,物体内部热量从高温部分传向低温部分,该过程中介质无宏观运动。从微观角度来说,热传导依靠晶格振动(声子传递)实现。本文研究对象无机固体(氮化铝)热量传递的主要载体是声子,即原子或离子在其晶格位置附近振动,这种振动以弹性波的形式在晶格中传播,在高温区域,这种原子振动更剧烈。当在静电卡盘各部分间存在温度梯度的时候,就会出现热传导现象,并且一定是从高的部分向低的部分传导。该过程可以通过傅里叶传热定律进行计算,如(1)式所示。

$$\dot{q}_x = \frac{q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \tag{1}$$

式中:  $\dot{q}_x$  表示热流密度;  $A$  表示垂直于热流的截面积;  $k$  则表示导热系数,负号代表热流传导的方向与温度梯度方向相反。

此外,计算物体内部的导热分布,需要借助热传导的微分方程。该方程基于傅里叶基础导热定律和能量守恒原理建立<sup>[6]</sup>,结合相应的定解条件就可以得出物体的内部导热分布。具体计算公式如(2)~(3)式所示。

$$\lambda \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \Phi = \rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} \tag{2}$$

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{\Phi}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial t}{\partial \tau} \tag{3}$$

在(2)式中,  $\rho$  表示导热体密度,  $c$  表示导热体定压比热容。(2)~(3)式均为直角坐标系下的导热微分方程。该方程明确指出了物体内部任意一点所发生的温度变化均是周围导热以及自身产热 2 个作用下的结果。

化学气相沉积用静电卡盘通常被要求在真空环境下进行工作,因此,静电卡盘的盘体外表面和轴结构的外侧均处于高真空度环境下,在真空腔室内部的面仅存在热辐射这一种散热方式。

物体表面通过电磁波(或光子)传递热量的过程被称为热辐射。辐射作为物质的固有本质之一,由分子、原子、离子等微观粒子构成,当这些粒子受到激发时,就会产生不断交替的电磁场,形成电磁波。因此,热辐射现象普遍存在于任何物体当中。

在辐射换热计算中,可以确定黑体辐射力是至关重要的。其计算公式如(4)式所示。

$$E_\lambda = \frac{dE}{d\lambda} / E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda \tag{4}$$

(4)式代表了单位时间内,物体的每单位辐射

面积在波长  $\lambda$  附近的单位波长间隔内,向半球空间所发射的能量,称之为单色辐射能力。

基于(4)式,结合黑体辐射的基本定律——普朗克定律<sup>[7]</sup>,黑体单色辐射力  $E_{b\lambda}$  和黑体自身温度  $T$  及热射线波长  $\lambda$  之间的函数关系如(5)式所示。

$$\frac{E_{b\lambda}}{T^5} = \frac{C_1}{(\lambda T)^5 \left( \exp \frac{C_2}{\lambda T} - 1 \right)} \tag{5}$$

式中:  $C_1$  为普朗克第一常数,其大小为  $C_1 = 3.747 \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^2$ ;  $C_2$  为普朗克第二常数,其大小为  $C_2 = 1.439 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 。

结合(4)~(5)式,可以推出斯蒂芬-玻尔兹曼定律,如(6)~(7)式所示。

$$E_b = \int_0^\infty E_{b\lambda} d\lambda = \int_0^\infty \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp \left( \frac{C_2}{\lambda T} \right) - 1} d\lambda = \sigma_b T^4 \tag{6}$$

$$E_b = C_b \left( \frac{T}{100} \right)^4 \tag{7}$$

在(6)式中,  $\sigma_b$  为黑体辐射常数,其数值大小  $\sigma_b = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。后续为了方便计算将(6)式改写为(7)式。其中,  $C_b$  为黑体辐射系数,其数值大小  $C_b = 5.67 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。(7)式表明黑体辐射力和热力学温度的四次方呈正比,故又称为四次方定律。该定律不仅指出了只要物体大于绝对零度就具备辐射能力,还表明了在不同温度下物体辐射能力存在差别。

CVD 工艺腔室通常包括气路系统、真空腔室、晶圆以及静电卡盘(如图 1 所示)。CVD 在众多半导体工艺中,对于晶圆温度分布要求较高,因此腔室壁除采用了铝合金作为外壁,还选择陶瓷作为腔室内壁材料进行热屏蔽,减少设备散热对温度均匀性的影响。静电卡盘处于腔室的下半部分,用于固定晶圆<sup>[8-10]</sup>。此外,在实际工艺过程中,气体会通过气路系统均匀地进入腔室,通过射频系统调节等离子体状态,使气体具有较强的化学活性,在衬底上进行

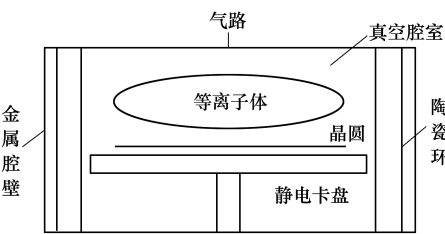


图 1 静电卡盘 CVD 工艺环境

化学沉积,静电卡盘需要保证高温以及温度分布均匀以保证成膜的均匀性<sup>[11-13]</sup>。

基于上述原理,结合 CVD 设备中具体情况,高温静电卡盘的传热方式如图 2 所示。相比传统静电卡盘,为了保证盘面的高温环境,采用轴结构减少静电卡盘与腔室之间的热传导。在腔室内,采用加热电路保证晶圆温度,通过热传导,将热量通过盘体传导到晶圆上。在工艺过程中,该结构处于热平衡状态,散热方式有热辐射和热传导 2 种。

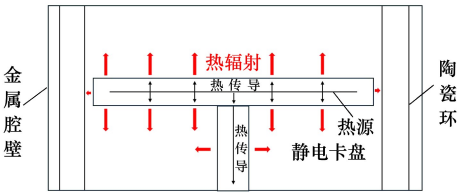


图 2 静电卡盘工艺环境下传热方式

1.2 静电卡盘建模

本文采用采用绘图软件 AutoCAD 和 Inventor 对静电卡盘几何模型进行三维建模,盘体模型如图 3 所示。

选择 CVD 高温设备常用的双加热区静电卡盘作为研究对象。几何模型由静电卡盘的盘体、轴结构、内区加热电路及外区加热电路四部分组成,将加热电路嵌入静电卡盘模型,加热电路结构如图 4 所示。

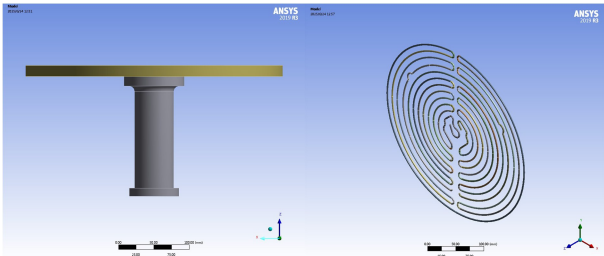


图 3 静电卡盘模型

图 4 加热电路模型

针对 CVD 环境下应用场景复杂的问题,本研究对部分场景进行了简化<sup>[14-15]</sup>,具体如下:

1) 通常在 CVD 工艺过程中,腔室需要保证真空环境,通过减少反应器内的压力,提高气体的平均自由程和扩散速度,提升成膜质量。因此,将腔室内部视为处于真空环境下,传热方式仅存在辐射和传

导。此外,在实际 CVD 腔室外侧通常由 75 ℃ 水和乙二醇组成的液体进行控温。因此,本研究设定腔室壁外侧边界条件为恒定 75 ℃。

2) 本研究的静电卡盘尺寸为 363 mm,主要用于 300 mm 尺寸的晶圆 CVD 工艺,主要关注静电卡盘中心 300 mm 范围内的温度均匀性情况,主要参数指标为温差和温度场分布情况。

3) 本研究静电卡盘轴底部为金属工装,具备较好的导热性,因此假设轴底部接触的温度为恒定温度,作为轴底部热交换的边界条件;

4) 本研究对加热电路进行等效简化,将原来一千多圈的螺旋状电阻丝等效为横截面直径 3 mm 的圆柱,并严格依照设计图纸中的分布路线进行分布。

静电卡盘模型的网格划分也是至关重要的一环,盘体内部密集排布的加热丝和极薄的轴壁厚度均对网格划分程度有较高要求。有限元离散过程的第一步就是模型的网格划分,网格划分的结果直接决定了模型的计算精度和运算时间<sup>[16]</sup>。

本文采用六边形网格,选择 200 万、320 万和 500 万网格数量进行了无关性验证,其中 320 万网格和 500 万网格的仿真结果基本一致,200 万网格相比于 320 万网格结果各项参数中温差的变化率最高,变化率为 2.55%,未超过 5%,可以确认仿真结果与网格无关。综合考虑准确性和计算效率,采用 320 万网格进行仿真。仿真网格盘体采用 6 mm 的最大尺寸,设置较大网格变化率解决接近加热丝的区域需要更细密网格的问题;专门针对电热丝及轴部分设置了更细密的网格尺寸,分别为 1.5 mm 和 1.2 mm,以确保不同区域网格排布的合理性。

基于上述建模,本文对 CVD 工艺过程的静电卡盘进行了仿真并采用测温设备对静电卡盘进行了温度分布测试,其仿真结果及实验测试结果如图 5~6 所示。

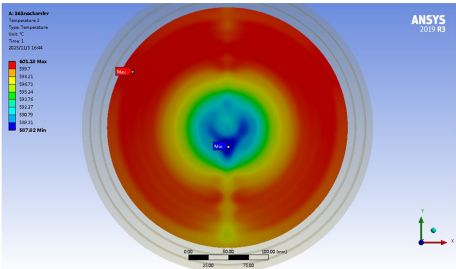


图 5 选用静电卡盘的仿真结果



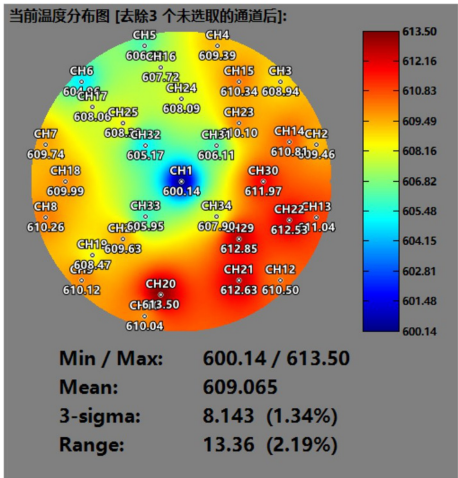


图 6 选用静电卡盘的测试结果

测试设备缺口位置按规定需对准静电卡盘的 notch 口位置,因此测试结果图逆时针旋转 120° 与仿真结果图位置对应。根据与实验结果对比可知,仿真及测试结果得到的温度差相近,均为 13.3 ℃ 左右,温度场分布大致相同,均为中间低,外围温区温度较高。

2 温度均匀性影响因素分析

2.1 轴结构对温度均匀性的影响分析

轴结构分析涉及的传热过程主要为热传导,因此影响因素主要为轴材料的热导率、轴长度和壁厚等,但考虑到设备装配需求,本研究忽略了轴长度以及底部结构等,仅研究依照现有设备能够优化的结构,其中包括轴与盘体的接触结构、轴材料的导热系数及轴壁厚。

2.1.1 轴与盘体的接触结构

轴和盘体的接触形式有 2 种:①轴内壁与盘体垂直接触,其结构剖面图如图 7 所示,该接触结构中,轴的主要特点是结构简单方便加工,并且轴与盘体的焊接均相对方便;②喇叭口形式,其结构剖面图如图 8 所示。

基于上述 2 种结构,利用仿真软件进行仿真实验分析。图 9 为垂直结构及喇叭口结构温度均匀性最好的仿真结果,其中喇叭口结构存在多种与静电卡盘接触面积选择。表 1 展示了不同接触结构的仿真数据对比。



图 7 轴内壁与盘体垂直接触结构剖面图



图 8 轴内壁与盘体喇叭口接触结构剖面图

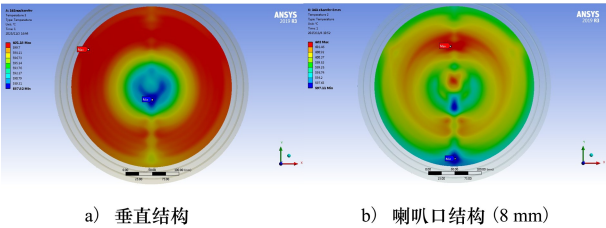


图 9 不同接触结构仿真结果

表 1 不同接触结构仿真数据对比表

| 结构           | 温差/℃  | 平均温度/℃ |
|--------------|-------|--------|
| 垂直结构         | 13.36 | 598.74 |
| 喇叭口结构(5 mm)  | 6.09  | 598.58 |
| 喇叭口结构(8 mm)  | 4.89  | 600.21 |
| 喇叭口结构(10 mm) | 7.56  | 598.25 |

根据图 9 和表 1 可知,当前盘体结构及轴的其他参数均不变情况下,采用接触半径为 8 mm 的喇叭口轴结构时盘体的温差最小,温度场分布也更均匀。对比这 2 种接触结构,并结合 1.1 节可知,热传导的过程与传导目标物体截面积有关,根据理论分析可以得出,随着静电卡盘的盘体与轴的接触面积变小,轴导出温度在理论上会越来越少。此外,相对于垂直结构,采用喇叭口结构,可以相对减少中心热量传导,进而提高静电卡盘的温度均匀性。因此,静电卡盘采用结构接触半径为 8 mm 的喇叭口结构温度场分布更均匀,该结论与理论分析相符。

2.1.2 轴所用材料的导热系数

通常情况下,AlN 陶瓷的常温导热系数在 170~230 W/(m·K),但在实际使用过程中,为了适应 CVD 的使用环境,会降低轴导热系数以控制温度场分布,因此需要通过工艺调整轴所采用的氮化铝陶

瓷的导热系数。基于热传导理论及公式可知,随着导热系数的降低,轴导热性能也会降低。根据理论分析的结果,进行仿真测试,得到不同轴所用材料的导热系数对温度均匀性的影响,热仿真结果如图 10 及表 2 所示。

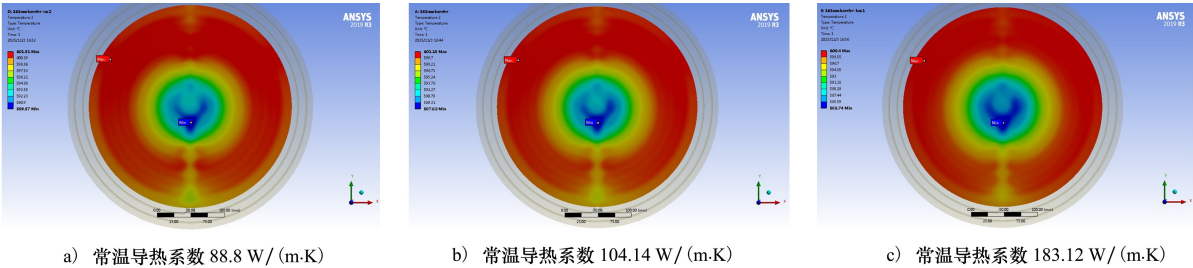


图 10 不同轴材料导热系数仿真结果

| 表 2 不同轴材料导热系数仿真结果对比表            |       |        |
|---------------------------------|-------|--------|
| 常温导热系数/(W·(m·K) <sup>-1</sup> ) | 温差/℃  | 平均温度/℃ |
| 88.80                           | 11.94 | 599.40 |
| 92.68                           | 12.71 | 599.03 |
| 104.14                          | 13.36 | 598.74 |
| 141.14                          | 15.65 | 597.67 |
| 183.12                          | 16.66 | 597.20 |

根据上述仿真结果可知,本文研究的静电卡盘的温度场分布为中心温度较低,边缘温度较高,即静电卡盘的中心散热效率较高,因此伴随着导热系数的下降(上升),轴散热量会下降(上升),温差也会下降(上升)。对于本文的静电卡盘结构,轴材料导热系数越低,静电卡盘上表面温度场分布均匀性会更好。观察图 10 可知,几种热仿真结果的温度分布大致相同,在导热系数逐渐增大的情况下,温度场分布不均匀的特点会更加明显。综合上述仿真结果分析可知,轴结构应运用导热系数更低的 AlN 陶瓷材料,即常温下导热系数为 88.8 W/(m·K)的材料,该材料能使静电卡盘上表面温度场分布更均匀,且

仿真结果与理论分析相符。

2.1.3 轴壁厚度

根据图 7 的轴结构剖面图可知,该轴结构存在极长但极薄的轴壁,减少盘体传导散热。研究轴壁厚度对于温度均匀性的影响效果,需要通过理论及仿真结果进行比对分析,才能更进一步地去设计,以提升该结构对于温度场分布的影响,让静电卡盘更符合 CVD 工艺环境的使用需求。

基于热传导理论及公式可知,随着壁厚的增大,热传导的截面积增大,热传导的热量也会随之增大。根据该理论分析,进行热仿真。热仿真结果如图 11 及表 3 所示。

| 表 3 不同轴壁厚仿真结果对比表 |       |        |
|------------------|-------|--------|
| 轴壁厚/mm           | 温差/℃  | 平均温度/℃ |
| 2                | 11.25 | 599.66 |
| 2.2              | 12.20 | 599.24 |
| 2.45             | 13.36 | 598.74 |
| 2.8              | 14.91 | 598.03 |
| 3                | 15.79 | 597.62 |

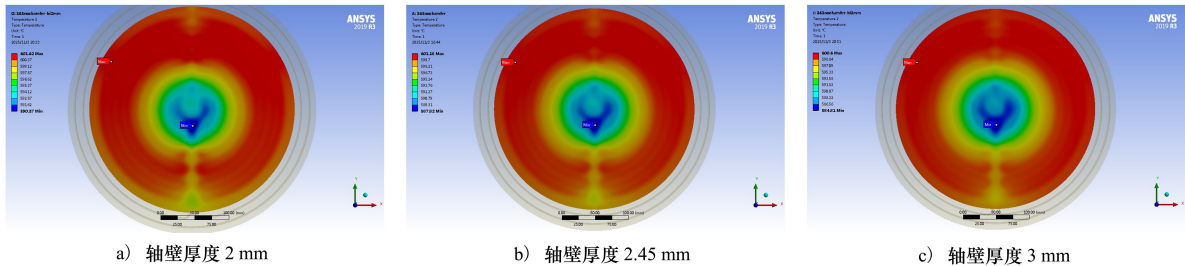


图 11 不同轴壁厚仿真结果

根据上述热仿真结果可知,在保持现有盘体结构及轴结构其他参数不变情况下,轴壁厚减少(增加),轴散热量随之下降(上升),温差也会随之上升(下降)。对于本文的静电卡盘结构,轴壁厚度越薄静电卡盘上表面温度场分布越均匀。由图 11 可知,几种热仿真结果的温度分布大致相同,仅温差在不断变化。综合上述仿真结果分析可知,轴结构壁厚大小选取 2 mm 时,温度场分布更均匀,也更适合 CVD 工艺环境下使用。但是,考虑静电卡盘机械结构合理性,为了防止轴壁过薄导致静电卡盘使用过程中发生损坏,壁厚设计不宜过薄。

2.2 盘体结构对温度均匀性的影响分析

盘体结构与轴结构的分析原则类似,会根据目前所采用 CVD 设备的装配需求,忽略部分影响因素。针对现有结构,研究加热丝分布、盘体尺寸以及在工程中出现的加热丝偏移对温度均匀性影响。

2.2.1 盘体尺寸

静电卡盘尺寸通常略大于晶圆尺寸,如本文研究的针对 300 mm 晶圆的静电卡盘尺寸为 363 mm。本文针对该类静电卡盘的结构以及 CVD 设备的尺寸进行计算后,又设计了 353 mm 和 373 mm 静电卡盘 2 种尺寸进行研究。对上述结构进行热仿真,结果如图 12 和表 4 所示。

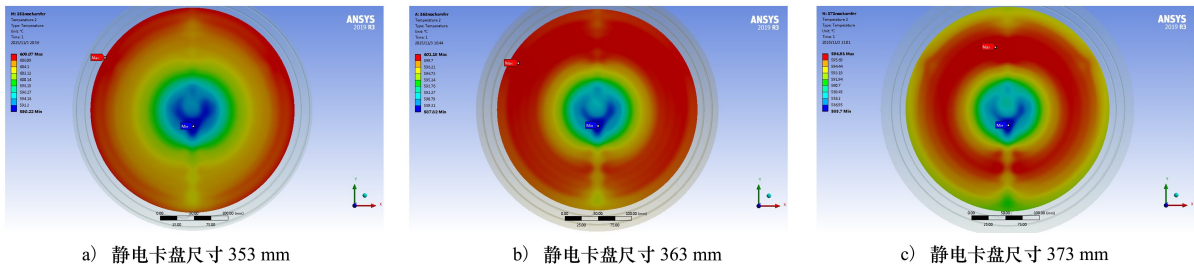


图 12 不同尺寸静电卡盘仿真结果

表 4 不同静电卡盘尺寸仿真结果对比表

| 静电卡盘尺寸/mm | 温差/℃  | 平均温度/℃ |
|-----------|-------|--------|
| 353       | 17.85 | 603.46 |
| 363       | 13.36 | 598.74 |
| 373       | 11.23 | 594.49 |

根据上述热仿真结果可知,在保持其他参数不变情况下,伴随着静电卡盘盘体尺寸的增大,温差降低,温度场分布更均匀,同时伴随着散热量的增大,平均温度降低。而温度分布方面,不同盘体尺寸的温度分布大致相同。结合 Hsu 等<sup>[17]</sup>对于扩展盘提升温度均匀性的研究结果,根据理论分析可知,伴随着静电卡盘尺寸的扩大,边缘区域散热量增大,理论上边缘区域温度会降低。综上所述,盘体尺寸扩展到 373 mm 后,使该类型静电卡盘的温差更小,温度场分布也更均匀。

2.2.2 加热丝倾斜

在实际工程中,通常会对静电卡盘进行 CT 扫描观察其内部状况,判断加热丝及吸附电极的状态。在扫描图像中,会出现部分静电卡盘加热丝整体倾斜的情况,这是由于加工工艺中出现定位误差,这类

误差在实际过程中通常最大为 1 mm 左右,该类型静电卡盘倾斜状态如图 13 所示。

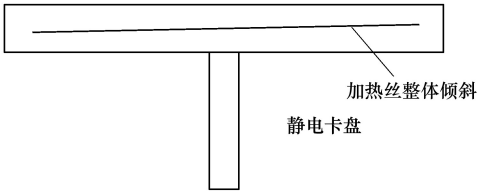


图 13 加热丝倾斜示意图

针对该误差,根据热传导理论可知,静电卡盘的加热丝倾斜方向更靠近盘面一侧温度会更高,而离盘面较远部分会更低。对加热丝倾斜的情况进行仿真分析,结果如图 14 及表 5 所示。

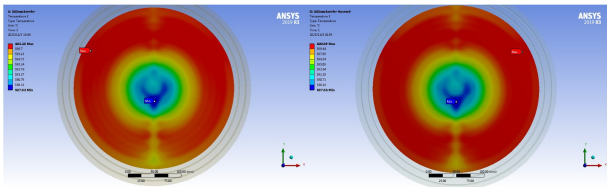


图 14 不同加热丝倾斜状态垂直结构静电卡盘仿真结果

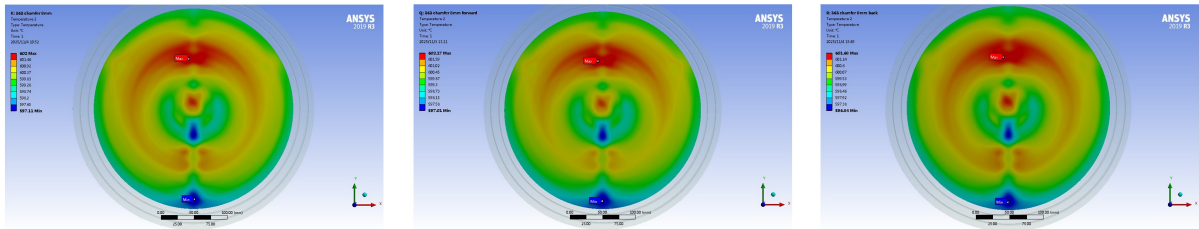


| 表 5 垂直结构静电卡盘加热丝倾斜仿真结果对比表 |       |        |
|--------------------------|-------|--------|
| 加热丝状态                    | 温差/℃  | 平均温度/℃ |
| 前倾 1 mm                  | 13.06 | 598.49 |
| 未倾斜                      | 13.36 | 598.74 |

根据对比结果,可以看出加热丝倾斜对温度场分布几乎没有影响,对温差的影响在 0.3 ℃。由于该类型静电卡盘温度分布中心温度低且边缘温度

高,加热丝倾斜理论上更容易对于静电卡盘的边缘区域温度分布产生影响,因此本文针对加热丝倾斜增加了喇叭口结构(8 mm)静电卡盘的实验。

根据图 15 及表 6 数据进行对比可以发现,加热丝倾斜对温差影响在 0.3 ℃ 以内,对温度场分布则几乎没有影响。根据理论分析,由于通常情况下加热丝倾斜的角度较小,因此对温度分布及温差影响较小。



a) 静电卡盘加热丝未倾斜                      b) 静电卡盘加热丝向前倾斜 1 mm                      c) 静电卡盘加热丝向后倾斜 1 mm

图 15 不同加热丝倾斜状态喇叭口结构静电卡盘仿真结果

| 表 6 喇叭口结构静电卡盘加热丝倾斜仿真结果对比表 |      |        |
|---------------------------|------|--------|
| 加热丝状态                     | 温差/℃ | 平均温度/℃ |
| 前倾 1 mm                   | 5.16 | 600.23 |
| 未倾斜                       | 4.89 | 600.21 |
| 后倾 1 mm                   | 4.84 | 599.92 |

| 表 7 静电卡盘不同加热丝排布结果对比表 |       |        |
|----------------------|-------|--------|
| 加热丝分布                | 温差/℃  | 平均温度/℃ |
| 原排布                  | 13.36 | 598.74 |
| 新排布                  | 6.69  | 578.41 |

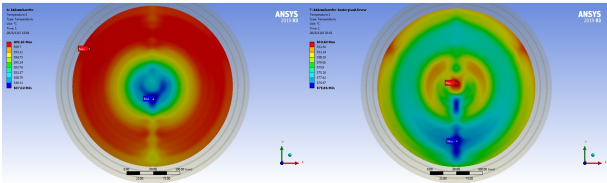
2.2.3 加热丝分布

本文静电卡盘的仿真及测试结果可以看出,该类型静电卡盘在实际环境使用中均存在中心温度过低引发温度场分布不均匀及温差较高的情况。本文在仿真过程中,根据实际加热丝的结构进行了区域划分。通过工艺设计分析,进行了符合结构设计的优化,为仿真划分的中心区域增加了 0.5 Ω 的加热丝。对比 2 种加热丝排布(优化分布结构)对温度均匀性的影响,仿真结果如图 16 及表 7 所示。

根据图 16 和表 7 可知,在优化加热丝排布后,温差明显减小,温度场分布也更均匀。仿真结果证明,在不同区域适当控制加热丝排布(区域内产生热量的大小),能够有效控制静电卡盘表面温度场分布,减小温差。由此可以得出结论:加热丝排布对于温差及温度场分布均有着显著影响。

3 结 论

本文针对 CVD 设备用的高温静电卡盘表面温度均匀性影响因素进行了仿真研究,并进行了测试验证。仿真结果表明,静电卡盘的加热丝排布及盘与轴之间的接触结构能有效地影响温度场分布及温差,从而提高静电卡盘表面的温度均匀性;工艺误差带来的加热丝倾斜则对温度均匀性几乎没有影响。静电卡盘轴材料的导热系数、轴壁厚度、静电卡盘的尺寸则对静电卡盘局部温度分布存在影响,适当进行调整可以使得整体温度分布更均匀。综上所述,CVD 设备静电卡盘设计中,需要根据要求,重点关



a) 静电卡盘加热丝原排布                      b) 静电卡盘加热丝优化后新排布

图 16 静电卡盘不同加热丝排布仿真结果

注加热丝排布和静电卡盘的盘体与轴的接触结构设计,使二者能够相互组合控制温度场均匀分布。需要控制边缘区域温度分布时,可以对盘体进行扩展(收缩)调整边缘区域温度场分布,使得静电卡盘整

体温度分布均匀。在控制中心区域温度分布时,可以通过调整轴结构的壁厚及热导率,调整中心区域的温度场分布,保证整体温度分布均匀,进而提升 CVD 成膜质量。

参考文献:

[1] SAMIR T. Improving wafer temperature uniformity for etch applications[D]. Texas: Texas Tech University, 2003.

[2] LEE H J, LEE S H. Numerical evaluation on surface temperature uniformity of multi-zone and single-zone ceramic heaters with the electrostatic chuck[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2021, 35(8): 3763-3770.

[3] YOON T W, CHO S I, CHOI M, et al. Heat transfer mechanism of electrostatic chuck surface and wafer backside to improve wafer temperature uniformity[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2023, 41(4): 14.

[4] 孙钰淳, 程嘉, 路益嘉, 等. 静电卡盘与晶圆之间的接触热阻研究[J]. 真空科学与技术学报, 2016, 36(1): 86-92.  
SUN Yuchun, CHENG Jia, LU Yijia, et al. Investigation on thermal contact resistance of Si-wafer and electrostatic chuck[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2016, 36(1): 86-92. (in Chinese)

[5] 冯鹏. HDPCVD 设备静电吸盘热流研究与仿真[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2023.  
FENG Peng. Research and simulation on heat flow of electrostatic chuck in HDPCVD equipment[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2023. (in Chinese)

[6] 陈豪龙, 唐欣越, 王润华, 等. 基于物理信息神经网络的多介质非线性瞬态热传导问题研究[J]. 力学学报, 2025, 57(1): 89-102.  
CHEN Haolong, TANG Xinyue, WANG Runhua, et al. Solving multi-media nonlinear transient heat conduction problem based on physics-informed neural networks[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2025, 57(1): 89-102. (in Chinese)

[7] 徐德宇. 基于半导体场效应的近场辐射换热调控机制及器件原型[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2024.  
XU Deyu. Near-field radiative heat transfer modulation mechanism and device prototype based on semiconductor field-effect[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2024. (in Chinese)

[8] 孙诗壮, 赵晋荣. 凸点结构及电学性能对 J-R 型静电卡盘吸附力影响的研究[J]. 真空科学与技术学报, 2023, 43(4): 305-313.  
SUN Shizhuang, ZHAO Jinrong. The effect of structure and electrical properties of the mesa on the electrostatic chuck force[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2023, 43(4): 305-313. (in Chinese)

[9] 孙诗壮, 赵晋荣. 晶圆材料对 J-R 型静电卡盘吸附力影响的研究[J]. 真空科学与技术学报, 2023, 43(6): 554-562.  
SUN Shizhuang, ZHAO Jinrong. Influence of wafer material on chuck force of J-R type electrostatic chuck[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2023, 43(6): 554-562. (in Chinese)

[10] 孙诗壮, 赵晋荣. 库仑型静电卡盘吸附力受电极结构及晶圆氧化层影响的研究[J]. 真空科学与技术学报, 2023, 43(8): 681-688.  
SUN Shizhuang, ZHAO Jinrong. The Influence of electrode structure and wafer material on chuck force of coulomb electrostatic chuck[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2023, 43(8): 681-688. (in Chinese)

[11] YOON T W, CHOI M, HONG S J. Thermal and electrical analysis of the electrostatic chuck for the etch equipment[J]. IEEE Trans on Semiconductor Manufacturing, 2023, 36(4): 653-665.

[12] ŁACH Ł, SVYETLICHNYY D. Recent progress in heat and mass transfer modeling for chemical vapor deposition processes[J]. Energies, 2024, 17(13): 3267.

[13] JALURIA Y, WONG S, JUMAAH O. Modeling and optimization of transport processes in thin film fabrication by chemical vapor deposition[J]. ASME Journal of Heat and Mass Transfer, 2025, 147(11): 111301.

[14] 张泽明, 黄利平, 赵继丛, 等. 等离子体刻蚀机静电吸盘温度控制方法仿真研究[J]. 真空科学与技术学报, 2015, 35(10): 1196-1202.  
ZHANG Zeming, HUANG Liping, ZHAO Jicong, et al. Simulation of temperature control for electrostatic chuck in plasma etch-



- ing[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2015, 35(10): 1196-1202. (in Chinese)
- [15] PATRA Umakanta, SAHA Sushantika, DAS Shreyasi, et al. Understanding the role of environment and dielectric capping on the electrical properties of WS<sub>2</sub> monolayers grown by chemical vapor deposition technique[J]. Journal of Applied Physics, 2025, 138(17): 174303.
- [16] 张骅. 旋转对称目标散射的有限元法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- ZHANG Hua. The finite element analysis of BOR's electromagnetic scattering problem[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006. (in Chinese)
- [17] HSU K C, YANG J Y, CHEN J Z, et al. Modeling and simulation of heat transfer characteristics of 12-inch wafer on electrostatic chuck[C]//2015 10th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference, 2015: 304-307.

## Analysis of factors affecting temperature uniformity of high-temperature electrostatic chucks in CVD equipment

DING Yankai, ZHAO Shike, QU Bo, WANG Shuai

(Beijing Vacuum Electronic Research Institute, Beijing 100015, China)

**Abstract:** The electrostatic chuck is a semiconductor process equipment that uses electrostatic adsorption force to attach a wafer to a surface and controls the surface temperature of the wafer through thermal conduction as the main temperature control method. It plays a key role in current integrated circuit equipment. The uniformity of temperature (temperature difference) directly affects the quality of wafer film formation and is one of the crucial indicators. This study focuses on the factors affecting heat transfer in electrostatic chucks under high-temperature CVD process environment. Firstly, a thermal conduction model between CVD chamber environment and electrostatic chuck is established using ANSYS Workbench; Then, the influence of different electrostatic chuck structures and engineering errors on the surface temperature uniformity of electrostatic chucks under CVD process environment is analyzed; Finally, experiments also verified the simulation results of one type of electrostatic chuck through CVD chamber. Based on the above analysis, the results indicate that for this type of electrostatic chuck, the contact structure between the disc body and the shaft, as well as the distribution of heating wires, have a significant impact on the temperature field distribution. The inclination of the heating wire has almost no effect on the temperature field distribution. The thermal conductivity of the shaft, the thickness of the shaft wall, and the size of the electrostatic chuck have an impact on the local temperature field distribution. The research content of this article has important guiding significance for the improvement of heat transfer theory of electrostatic chucks and the subsequent design optimization of electrostatic chucks.

**Keywords:** electrostatic chuck; thermal simulation; IC equipment; CVD

**引用格式:** 丁衍凯, 赵世柯, 瞿波, 等. CVD 设备高温静电卡盘温度均匀性影响因素分析[J]. 西北工业大学学报, 2026, 44(2): 426-434.

DING Yankai, ZHAO Shike, QU Bo, et al. Analysis of factors affecting temperature uniformity of high-temperature electrostatic chucks in CVD equipment[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2026, 44(2): 426-434. (in Chinese)