

晶圆键合台温度均匀性提升研究

徐星宇¹, 李早阳¹, 史睿菁¹, 罗金平¹, 王成君², 李安华², 薛志平², 张慧³, 张辉³

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 中国电子科技集团公司第二研究所, 030024, 太原; 3. 东南大学机械工程学院, 211189, 南京)

摘要: 为提升集成电路用晶圆键合台的温度均匀性,以当前主流的 200 mm 晶圆键合台为研究对象,开展了键合台升温实验,建立并验证了键合过程三维热量传递数值模型,研究了键合台内部温度形成与分布规律,提出了能够显著提升键合台温度均匀性的简便有效策略。结果表明:加热盘内部加热丝缠绕的非中心对称分布引起键合台工作面温度的不均匀分布,在不考虑上、下加热盘高低温区匹配的情况下,工作面整体温度均匀性为 3.2%,径向温度均匀性为 1.1℃;对上或下加热盘进行旋转,使得两个加热盘的高低温区分布形成空间补偿,可大幅提升键合台温度均匀性;在将上加热盘逆时针匹配旋转 50°后,键合台工作面的整体温度均匀性达到 1.3%,径向温度均匀性达到 0.3℃。该研究有助于深入认识晶圆键合台内部的热量传递与温度分布规律,对于键合台的精细设计和键合工艺水平的提升具有参考意义。

关键词: 集成电路;晶圆键合台;温度均匀性;数值模拟

中图分类号: TK124;TN433 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202411011 **文章编号:** 0253-987X(2024)11-0119-09

Research on Improving Temperature Uniformity of Wafer Bonding Platforms

XU Xingyu¹, LI Zaoyang¹, SHI Ruijing¹, LUO Jinping¹, WANG Chengjun²,

LI Anhua², XUE Zhiping², ZHANG Hui³, ZHANG Hui³

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. The 2nd Research Institute of CETC, Taiyuan 030024, China; 3. School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: To enhance the temperature uniformity of wafer bonding platforms for integrated circuits, the mainstream 200 mm wafer bonding platform is selected as the subject of research, and heating experiments are conducted on this platform. A three-dimensional heat transfer numerical model of the bonding process is developed and validated to study the temperature formation and distribution within the bonding platform. A simple and effective strategy is proposed to significantly improve the temperature uniformity of the bonding platform. The research findings reveal that the non-centrally symmetrical distribution of heating wires wound inside the heating plate leads to uneven temperature distribution on the working surface of the bonding platform. Without considering the alignment of high and low-temperature zones of the upper and lower heating plates, the overall temperature uniformity of the working surface is

收稿日期: 2024-01-12。 作者简介: 徐星宇(2000—),男,硕士生;李早阳(通信作者),男,副教授,博士生导师。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB3404303)。

网络出版时间: 2024-07-26

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20240726.0844.002>

3.2%, with a radial temperature uniformity of 1.1 °C. Rotating either the upper or lower heating plate provides spatial compensation for the distribution of high and low-temperature zones of the two heating plates, resulting in a substantial enhancement in the temperature uniformity of the bonding platform. Following a 50° counterclockwise rotation of the upper heating plate, the overall temperature uniformity of the working surface of the bonding platform achieves 1.3%, with the radial temperature uniformity reaching 0.3 °C. This research contributes to a deeper comprehension of heat transfer and temperature distribution within the wafer bonding platform, which is of reference significance to the fine design of bonding platforms and the improvement of the bonding processes.

Keywords: integrated circuit; wafer bonding table; temperature uniformity; numerical simulation

在摩尔定律的引导下,集成电路行业一直高速发展,晶体管特征尺寸已经从 100 nm 缩小到亚 1 nm^[1-2]。随着晶体管栅极长度日益接近物理极限,量子效应和短沟道效应越来越严重^[3],内部电子自发地通过源极和漏极,导致漏电流增加,进而限制了晶体管的进一步缩小^[4-6]。以功能多样化特征的三维异质异构晶圆键合技术是超越摩尔定律的一条重要途径^[7-8],该技术在微电子制造、微机电系统封装、多功能芯片集成以及其他新兴领域具有广泛的应用前景^[9]。晶圆键合是将晶圆或芯片在垂直于平面方向上进行堆叠^[10],不同器件或硬件的复杂集成,都要以晶圆键合技术为基础^[11-12]。目前晶圆键合技术发展存在的挑战主要有晶圆对准精度、键合完整性以及温度和压力均匀性控制等^[13]。其中,键合温度均匀性对晶圆键合工艺具有重要影响。

键合台是完成晶圆键合工艺的重要装备,温度均匀性是体现其工作性能的核心指标^[14-15]。以硅-硅直接键合为例,对于直径 200 mm 的晶圆,温度每提升 100 °C 导致晶圆沿径向膨胀 32 μm,这就要求键合台有足够高的径向温度均匀性^[16]。同时,为了保证键合工艺的一致性,对键合台整体温度均匀性也有很高的要求。当前,德国苏斯公司所研制的 XBS200 晶圆键合台可以在最高 550 °C 的条件下实现温度均匀性低于 1%^[17],奥地利易伟杰公司所研制的 EVG501 晶圆键合系统可以在最高 450 °C 的条件下实现温度均匀性低于 1%^[18],国内研制的热压键合设备可以在最高 550 °C 的条件下实现温度均匀性低于 1.5%^[19]。总体而言,在键合台的温度均匀性方面,我国与国际先进水平仍有一定差距。

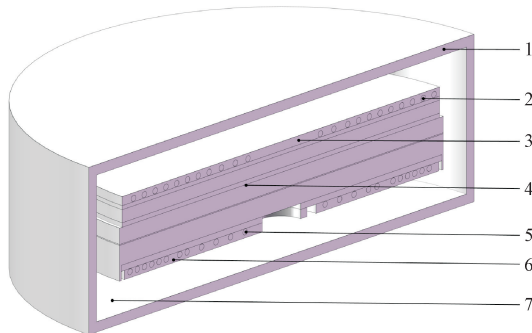
提升晶圆键合台温度均匀性需要从结构、材料、工艺等多个方面考虑。传统的试验研究存在加工和试错成本高昂、周期漫长等缺点。相比之下,采用计算传热学的方法建立键合台全三维热量传递数值模

型,研究温度均匀性的影响因素及作用规律,对于提高键合台温度均匀性、缩短产品研发周期、降低开发成本具有重要意义。在传统加热装备的研究开发过程中,已经广泛采用数值模拟方法研究温度场的分布及其变化规律^[20-23],但在晶圆键合台温度均匀性设计中尚未使用。这主要是由于键合台强三维特征、复杂的结构及热量传递过程,使得准确描述键合过程中温度分布均匀性存在困难。

本文针对当前主流的 200 mm 晶圆键合台,通过升温实验测量获得工作面监测点温度分布,以此为依据建立并验证键合台全三维热量传递数值模型;采用该模型计算分析键合台温度分布的形成规律,对温度分布均匀性进行定量评估,分析导致键合台温度均匀性不佳的原因,进而提出能够显著提升键合台温度均匀性的简便有效方法。

1 晶圆键合台工作原理及升温实验

图 1 所示为本研究采用的 200 mm 晶圆键合台的内部结构示意图。可以发现,该晶圆键合台主要由壳体、加热系统和两者之间的真空腔室组成。壳



1—壳体;2—上加热线;3—上加热盘;4—工作面;
5—下加热丝;6—下加热盘;7—真空腔室。

图 1 晶圆键合台结构示意图

Fig. 1 Structural schematic diagram of wafer bonding table

体由不锈钢材质构成,加热系统由上、下两个金属加热盘构成,加热丝嵌套在加热盘内部,从中心向四周呈涡状线分布,真空腔室位于壳体和加热盘之间,工作时内部压强为 10^{-6} Pa。键合过程中,将晶圆放置于上、下加热盘相互贴合的直径略大于 200 mm 的工作面上,通过一定的升温加压工艺完成键合。键合过程中对温度均匀性的要求主要体现在工作面整体温度均匀性以及径向温度均匀性^[24]。

为了获得晶圆键合台工作面温度均匀性的分布状况,并为后续数值模型的建立提供验证依据,在图 1 所示的晶圆键合台上开展了升温实验。实验过程中,上下加热盘内部的控温点以 10 °C/min 的速率升温并在 150~450 °C 之间每隔 50 °C 恒定一段时间,以使键合台温度达到稳定。在工作面选取 8 个监测点,采用 TC-Wafer 热电偶进行温度测量。图 2 所示为 8 个测温点的位置分布图,可以发现,1 号测点位于工作面的中心,2~5 号测点分布于半径 50 mm 的圆周上,6、7、8 号测点分布于半径 85 mm 的圆周上。

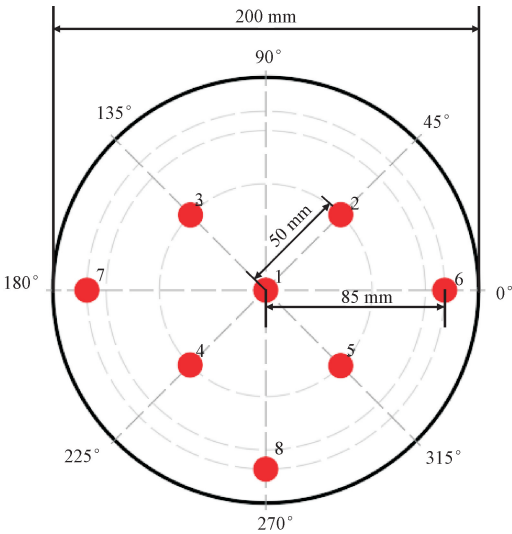


图 2 工作面温度测点位置分布图

Fig. 2 Distribution of temperature monitoring points in working plane

图 3 所示为升温实验过程中,工作面各测点温度随时间的变化曲线。可以发现,监测点温度与控温点温度变化呈现一致的规律,即升温过程中在 150~450 °C 之间每隔 50 °C 实现了温度的相对恒定。从图 3 中局部放大图可以发现,在恒温阶段各测点温度比较稳定,例如,1 号测点温度相对比较高,而 7 号测点温度则始终比较低,这说明此时键合台工作面温度分布已达到了相对稳定状

态,能够为数值模型的验证提供很好的对比依据。考虑到键合台工作面温度均匀性随温度升高有变差的趋势,后续将着重以最高温度 450 °C 的工况进行详细分析。

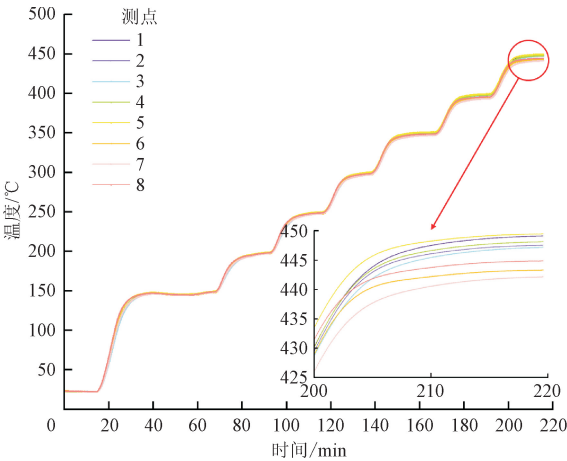


图 3 测点温度随时间的变化

Fig. 3 Variation of temperature at monitoring points with time

图 4 为恒温 450 °C 工况下工作面 8 个测点的温度分布,对应于图 3 中 210 min 时的情况。可以发现,最高温度位于非中心位置的测点 5,为 449.6 °C;最低温度位于边缘位置的测点 7,为 441.3 °C;两者的差值为 8.3 °C,8 个测点的平均温度为 446.2 °C。定义整体温度均匀性表达式如下

$$T_{\text{uni}} = \frac{T_{\text{H}} - T_{\text{L}}}{T_{\text{ave}}} \times 100\% \tag{1}$$

式中: T_{uni} 为整体温度均匀性; T_{H} 为最高温度; T_{L} 为最低温度; T_{ave} 为平均温度。计算可得,8 个测点的温度均匀性为 1.9 %。

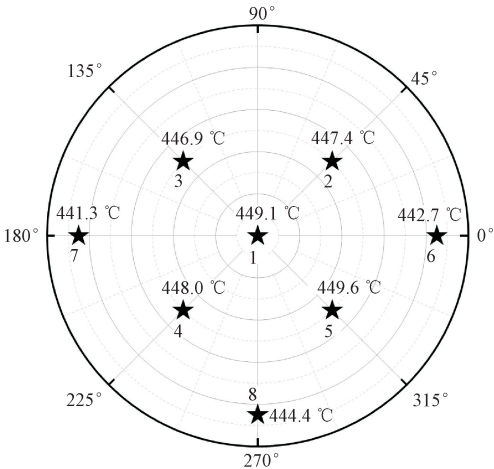


图 4 工作面测点温度实验测量结果

Fig. 4 Experimental measurement result of temperature at monitoring points in working plane

通过上述分析可以发现,当前的晶圆键合台在加热升温过程中,工作面温度分布呈现明显的不均匀,半径 85 mm 范围内 8 个测点的温度均匀性为 1.9%,当拓展到直径略大于 200 mm 的工作面范围时,温度不均匀性将进一步加剧,这与国际先进水平有一定差距^[25]。同时发现,工作面最高温度并非位于圆心位置,这也意味着由中心到边缘沿各个方向的径向温度分布是不一致的,这将导致键合升温过程中晶圆沿各个方向膨胀不一致、键合工艺一致性差。另外,采用上述实验方法测量工作面的温度分布时,只能获得有限测点位置的温度,无法获得整个工作面的温度分布并进行评价。因此,开展晶圆键合台三维热量传递数值建模与模拟研究,实现键合台整体温度分布的可视化,这对于阐明工作面温度分布规律、提升温度均匀性具有重要作用。

2 数值模型的建立与验证

晶圆键合台的结构如图 1 所示。在加热升温过程中,键合台内部上、下金属加热盘和壳体内部的热量以传导方式进行,真空腔室内部压强接近真空,流动非常微弱,腔室各可见壁面间的热量则以辐射的方式进行。描述晶圆键合台内部热量传递的主要控制方程有

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho c_p \mathbf{u} T) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_Q$$

(2)

$$\frac{q(\mathbf{x})}{\varepsilon(\mathbf{x})} - \int_{\mathbf{x}^* \in \mathcal{N}} K(\mathbf{x}, \mathbf{x}^*) \frac{1 - \varepsilon(\mathbf{x}^*)}{\varepsilon(\mathbf{x}^*)} q(\mathbf{x}^*) dS^* = \sigma_{SB} T^4(\mathbf{x}) - \int_{\mathbf{x}^* \in \mathcal{N}} K(\mathbf{x}, \mathbf{x}^*) \sigma_{SB} T^4(\mathbf{x}^*) dS^* \quad (3)$$

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{x}^*) = - \frac{[(\mathbf{x} - \mathbf{x}^*) \cdot \mathbf{n}][(\mathbf{x} - \mathbf{x}^*) \cdot \mathbf{n}^*]}{\pi [(\mathbf{x} - \mathbf{x}^*) \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}^*)]^2} \quad (4)$$

式中: ρ 为密度; t 为时间; $\mathbf{u}$ 为速度矢量; c_p 为比定压热容; T 为温度; λ 为导热系数; S_Q 为热量源项; $q(\mathbf{x})$ 为空间每个辐射微元净辐射热流; $T(\mathbf{x})$ 为空间每个辐射微元表面温度; $\varepsilon(\mathbf{x})$ 为表面发射率; $\mathbf{x}$ 和 $\mathbf{x}^*$ 为辐射表面微元; dS^* 为表面微元 $\mathbf{x}^*$ 的面积; σ_{SB} 为斯特藩 - 玻尔兹曼常数,取值 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; $K(\mathbf{x}, \mathbf{x}^*)$ 为辐射表面微元 $\mathbf{x}$ 与 $\mathbf{x}^*$ 之间的可见因子,如果 $\mathbf{x}$ 与 $\mathbf{x}^*$ 之间不可见,则 $K(\mathbf{x}, \mathbf{x}^*)$ 为 0; $\mathbf{n}$ 为辐射表面单位法向量。

为了求解上述控制方程,需采用合理的边界条件。根据晶圆键合台工作时所处的环境条件,在键合台不锈钢外壁面采用对流辐射混合边界条件,对

流换热系数为 $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[26],表面发射率为 0.28,环境温度为 300 K。计算过程中同时给上、下加热丝添加功率以模拟加热升温稳定状态,使得工作面最高温度达到 450℃。

为了提高计算效率与精度,本文采用六面体对晶圆键合台进行网格划分。加热丝结构纤细且加热盘结构复杂,故针对这两个部件进行了计算网格加密。网格数影响计算效率和结果的准确性,本文以工作面最高温度为对比参数进行网格无关性验证,结果如表 1 所示。可以发现,当网格数采用 410 万及以上时,工作面的最高温度近似相同,而当网格数采用 410 万以下时,工作面最高温度随网格数变化波动较大。考虑到网格数过大会导致计算时间较长,本文最终选用 410 万网格进行计算分析。图 5 所示为计算网格划分图,为了更清晰地展示晶圆键合台内部各层间的位置关系,对真空腔室的网格进行了隐藏。

表 1 不同网格数量下工作面最高温度

Table 1 Maximum temperature in the working plane for different mesh numbers

网格数/万	最高温度/℃
210	438.4
300	444.2
410	450.0
500	449.5
600	449.1

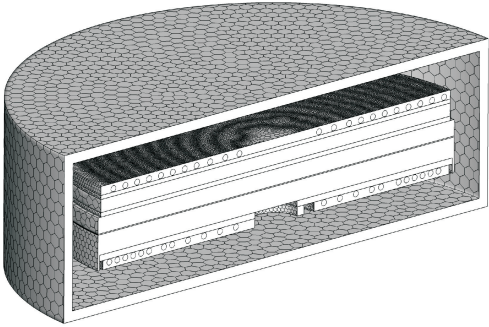


图 5 晶圆键合台计算网格

Fig. 5 Computational mesh of the wafer bonding table

采用上述建立的数值模型,模拟计算了晶圆键合台内部的温度分布,并着重分析了前述实验测量中 8 个测点位置的温度,如图 6 所示。可以发现,模拟结果中工作面最高温度为测点 5 处的 449.3℃,最低温度为测点 7 处的 441.4℃,两者差值为 7.9℃,8 个测点的平均温度为 446.4℃,根据式(1)计算可得温度均匀性为 1.8%,与实验测量结果非常吻合。将图 4 实验测量温度和图 6 模拟计算温度进行对

比,结果见图 7。可以发现,两者测点温度随测点序号的变化趋势一致,且各测点处两者温度非常接近,最大温差在测点 2 处,仅为 1.1℃。上述分析表明,本文所建立的三维热量传递数值模型,能够准确描述晶圆键合台内部的热量传递过程及温度分布规律,其计算结果是准确可靠的。因此,该数值模型可以用来研究并发现导致晶圆键合台温度不均匀分布的原因,并为提升温度均匀性提供科学依据。

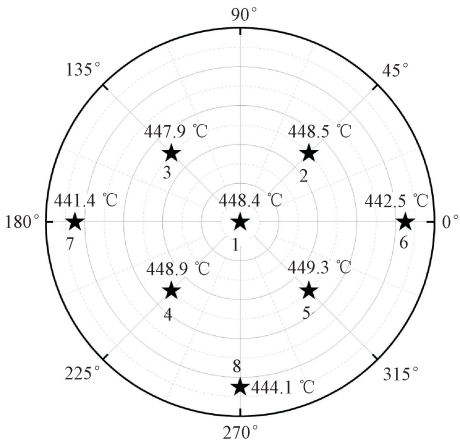


图 6 工作面测点温度分布模拟计算结果
Fig. 6 Temperature distribution of monitoring points in working plane by numerical simulation

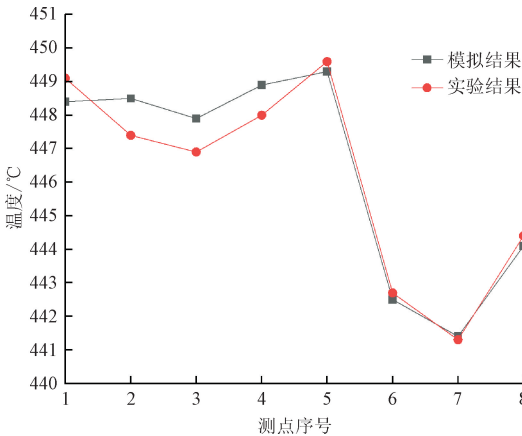


图 7 测点温度分布的实验测量和模拟分析对比图
Fig. 7 Comparison between experimental measurement and simulation analysis of temperature distribution at monitoring points

3 晶圆键合台温度形成规律

采用上述建立并经过实验验证的晶圆键合台三维热量传递数值模型,详细计算分析了晶圆键合台内部的温度形成与分布规律。图 8 所示为键合台纵向剖面的温度分布图。可以发现,在纵向剖面上整

个加热盘沿径向的温度分布呈现中间稍低、向外升高进而降低的趋势,工作面处的径向温度变化明显、温差较大。四周温度低的主要原因是此处辐射散热除了通过上、下表面进行外,还可以通过圆周方向的曲面进行,而中心区域则只能通过上下表面散热。

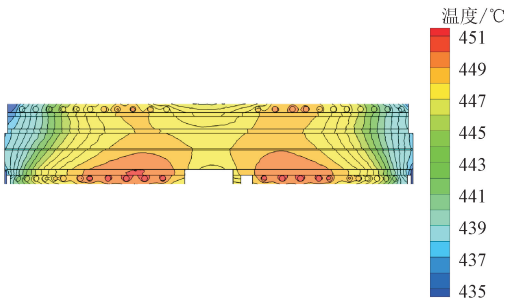
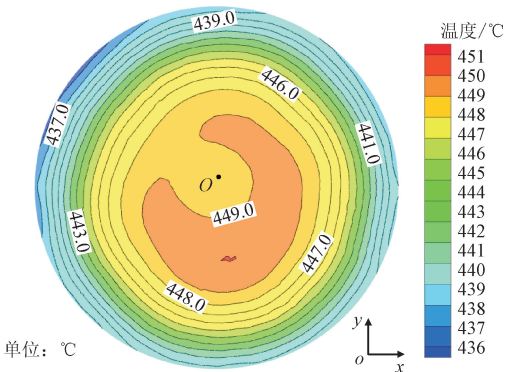


图 8 纵向剖面温度分布图
Fig. 8 Temperature distribution map of longitudinal section

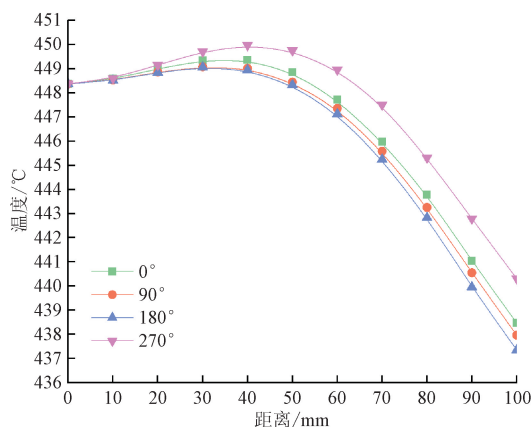
图 9 所示为图 8 中工作面的温度分布情况,其中图 9(a)为温度分布云图。可以发现,高温位于工作面的右下区域,低温位于工作面的外围,在左上边缘尤为突出。整个工作面最高温度为 450.0℃,最低温度为 435.6℃,温差为 14.4℃,平均温度为 444.7℃,根据式(1)计算得工作面的整体温度均匀性为 3.2%,明显大于图 6 所示 8 个测点的温度均匀性 1.8%。鉴于整个工作面温度分布呈现明显的非中心对称,从图 9(a)中取出与 x 轴正方向夹角分别为 0°、90°、180°、270° 共 4 个径向方向上的温度,绘制成图 9(b)。可以发现 4 个方向中心与边缘的温差分别为 9.9、10.4、11.0、8.1℃。定义径向温度均匀性表达式为

$$T_R = \sigma(T_C - T_E) \tag{5}$$

式中: T_R 为径向温度均匀性; T_C 为工作面的径向中心温度; T_E 为径向边缘温度; σ 为标准差。由式(5)可得,径向温度均匀性为 1.1℃。



(a)工作面温度云图

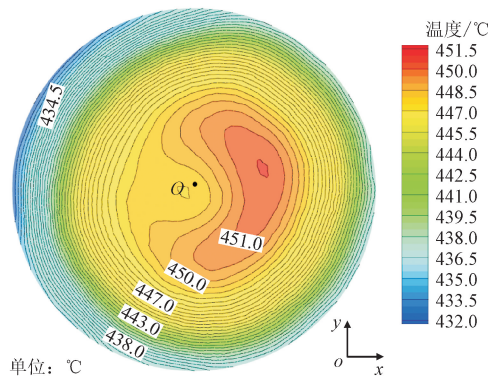


(b) 径向温度分布曲线

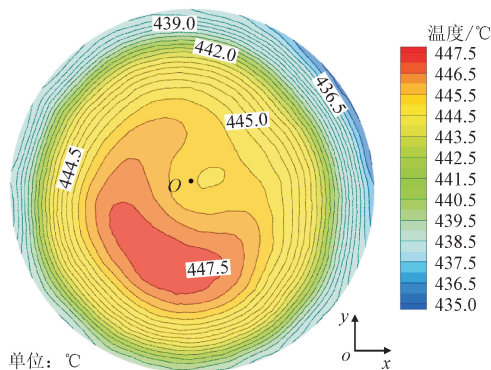
图9 原始模型工作面温度分布情况

Fig. 9 Temperature distribution in the working plane of original model

图9中晶圆键合台工作面温度分布是正常工作状态下同时开启上、下两个加热盘时形成的。为了寻找导致温度分布不均匀的原因,现分别模拟获得上、下加热盘单独加热时工作面的温度分布,如图10所示。可以发现,只开启上加热盘加热时,高温区位于工作面的右侧区域,低温区位于工作面的左



(a) 只开启上加热盘



(b) 只开启下加热盘

图10 只开启上/下加热盘时工作面温度云图

Fig. 10 Temperature distribution in the working plane when only the upper/lower heating plate is turned on

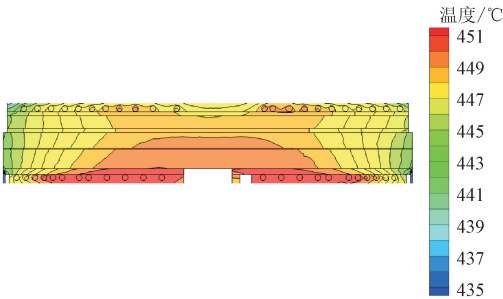
侧区域;只开启下加热盘加热时,高温区位于工作面的左下区域,低温区位于工作面的右上区域。这表明上、下加热盘单独加热时工作面温度已经表现出了明显的不均匀分布,而导致单盘加热温度不均匀分布的主要原因是加热盘内部加热丝缠绕的非中心对称分布。根据第1节中描述可知,加热丝嵌套在加热盘内部,从中心向四周呈涡状线分布,这使得加热丝从中心到边缘难以呈现完美的中心对称分布,导致工作面总会出现有的区域温度高,有的区域温度低。在上、下单个加热盘的影响下,两盘共同加热时则出现了图9所示的高温区位于工作面右下区域的现象,正好位于两个单盘加热时各自高温区的重叠位置。因此,在难以克服上、下加热盘单独加热存在温度分布不均匀的情况下,可以调整两个加热盘的周向相对位置,使两者的高温与低温区域在空间上相互补偿,以此提升工作面的温度分布均匀性。

4 晶圆键合台温度均匀性提升

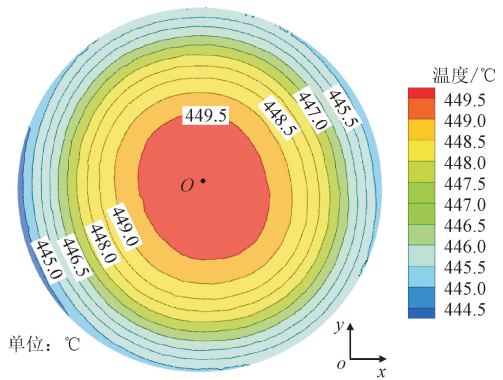
为了改善上、下加热盘同时加热时工作面的温度分布均匀性,需要设法消除工作面上产生的高温区和低温区。由图10可知,可以将上加热盘或下加热盘进行旋转,避免单独上加热盘加热和单独下加热盘加热时的高温区和低温区出现在相邻区域,从而改善温度均匀性。在图10(a)和图10(b)中,上、下加热盘单独加热时工作面高温区分别位于 xoy 坐标系的 20° 方向和 250° 方向,两者夹角为 230° 。将上加热盘逆时针旋转 50° 可使两个高温区域位于工作面圆心的两侧并使夹角为 180° 。此时低温区也位于工作面圆心的两侧,这在空间上就形成了相互补偿关系。

针对上加热盘旋转后的改进模型进行三维数值建模。为了保证结果具有可比性,改进模型的网格参数和边界条件均与原始模型相同。图11(a)所示为改进模型纵向剖面温度分布,与图8对比可以发现,在纵剖面上整个加热盘沿径向的温度分布呈现中间高、四周低的趋势,工作面处的径向温差减小。图11(b)所示为改进模型工作面的温度云图,可以发现工作面温度呈现中间高、四周低的趋势,避免了图9中的高温区偏心分布的现象。在图11(b)中,整个工作面最高温度为 449.8°C ,最低温度为 444.2°C ,温差为 5.6°C ,平均温度为 447.5°C ,根据式(1)计算的温度均匀性为 1.3% ,明显优于图9(a)中的 3.2% 。图12(a)为改进模型工作面的8个测点温度分布情况,其中最高温度为测点1处的 449.7°C ,最

低温度为测点 7 处的 446.0℃,温差为 3.7℃;8 个测点的平均温度为 448.1℃,温度均匀性为 0.8%,优于图 6 中原始模型的 1.8%。从图 11(b)中取出与 x 轴正方向夹角分别为 0°、90°、180°、270° 共 4 个径向方向上的温度,绘制成图 12(b)。可以发现 4 个方向中心与边缘的温差分别为 4.8、4.4、5.3、4.6℃。根据式(5),可得径向温度均匀性为 0.3%,远小于图 9(b)中的 1.1%。



(a)纵向剖面温度分布图



度均匀性的计算公式,除旋转匹配上、下加热盘外,还可以通过提高工作面的最低温度来提高温度均匀性,而最低温度主要出现在工作面的边缘区域。故可以通过改变加热丝缠绕方式、在工作面边缘布置保温层、使用导热系数更大的材料等措施来提高工作面边缘区域的温度,进而提高工作面温度均匀性,这些策略将在后续工作中进行研究。

5 结 论

本文针对集成电路行业晶圆键合技术使用的键合台的温度均匀性开展研究,建立了晶圆键合台三维热量传递数值模型,开展了键合台升温实验进行模型验证,以此为基础研究了键合台内部温度的形成与分布规律,提出了能够显著提升键合台温度均匀性的简便有效技术方案,主要结论如下。

(1)建立了晶圆键合台三维热量传递数值模型,模拟获得键合台工作面8个监测点温度均匀性为1.8%,与实验测量的1.9%十分吻合,两者对应测点温度非常接近、最大温差仅为1.1℃。上述表明所建立的数值模型是准确可靠的,能够用来研究晶圆键合过程中的热量传递与温度分布规律。

(2)阐明了键合台内部温度形成与分布规律,在不考虑键合台上下加热盘高低温区匹配的情况下,单个加热盘内部加热丝缠绕的非中心对称分布引起温度分布的不均匀,此时键合台工作面温度分布呈现中间稍低、向外升高进而降低的趋势,径向温度变化明显、温差较大,整个工作面温度均匀性为3.2%、径向温度均匀性为1.1℃。

(3)提出了显著提升键合台温度均匀性的简便有效策略,具体操作为将上下加热盘进行旋转匹配,使得单独上加热盘加热和单独下加热盘加热时的高温区和低温区形成空间匹配,从而改善温度均匀性。在本研究的结构中,将上加热盘逆时针旋转50°后,整个工作面的温度均匀性达到1.3%,径向温度均匀性达到0.3℃。工作面温度均匀性的大幅提升对于保障键合过程中晶圆膨胀变形均匀、键合工艺一致具有重要意义。

参考文献:

[1] WU Fan, TIAN He, SHEN Yang, et al. Vertical MoS₂ transistors with sub-1-nm gate lengths [J]. *Nature*, 2022, 603(7900): 259-264.

[2] LUNDSTROM M. Moore's law forever? [J]. *Science*, 2003, 299(5604): 210-211.

[3] KAWAURA H, SAKAMOTO T, BABA T. Observation of source-to-drain direct tunneling current in 8 nm gate electrically variable shallow junction metal-oxide-semiconductor field-effect transistors [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 76(25): 3810-3812.

[4] FRANKLIN A D. Nanomaterials in transistors: from high-performance to thin-film applications [J]. *Science*, 2015, 349(6249): aab2750.

[5] THEIS T N, SOLOMON P M. It's time to reinvent the transistor! [J]. *Science*, 2010, 327(5973): 1600-1601.

[6] CHAU R, DOYLE B, DATTA S, et al. Integrated nanoelectronics for the future [J]. *Nature Materials*, 2007, 6(11): 810-812.

[7] 向伟伟. 微系统与 SiP、SoP 集成技术 [J]. *电子工艺技术*, 2021, 42(4): 187-191.

XIANG Weiwei. Microsystem with SiP and SoP Integration Technology [J]. *Electronics Process Technology*, 2021, 42(4): 187-191.

[8] STIEBING M, VOGEL D, STELLER W, et al. Challenges in the reliability of 3D integration using TS-Vs [C]//2015 16th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 1-8.

[9] 王晨曦, 王特, 许继开, 等. 晶圆直接键合及室温键合技术研究进展 [J]. *精密成形工程*, 2018, 10(1): 67-73.

WANG Chenxi, WANG Te, XU Jikai, et al. Research progress of wafer direct bonding and room-temperature bonding technology [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2018, 10(1): 67-73.

[10] 刘汉诚. 三维电子封装的硅通孔技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.

[11] 郝继山, 向伟伟. 微系统三维异质异构集成与应用 [J]. *电子工艺技术*, 2018, 39(6): 317-321.

HAO Jishan, XIANG Weiwei. 3D heterogeneous integration for micro-system and its application [J]. *Electronics Process Technology*, 2018, 39(6): 317-321.

[12] 葛勋冲, 赵晓东. 晶圆键合技术与微电子机械系统新进展 [J]. *电子工业专用设备*, 2004, 33(7): 15-20.

GE Maichong, ZHAO Xiaodong. The advances in wafer bonding and MEMS [J]. *Equipment for Electronic Products Manufacturing*, 2004, 33(7): 15-20.

[13] HWANG C G. New paradigms in the silicon industry [C]//2006 International Electron Devices Meeting. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 4154254.

[14] 江智轩. 真空气淬炉温度及系统精度不合格故障分析 [J]. *设备管理与维修*, 2020(7): 21-22.

JIANG Zhixuan. Fault analysis of temperature and system precision nonconformity in vacuum quenching furnace [J]. Plant Maintenance Engineering, 2020(7): 21-22.

[15] 易光. 真空处理炉炉温均匀性探讨 [J]. 材料工程, 1997, 25(4): 14-17.

YI Guang. Homogeneity of temperature in vacuum heat treatment equipment [J]. Journal of Materials Engineering, 1997, 25(4): 14-17.

[16] 陈全胜, 罗纳德·J 古特曼, L 拉斐尔·赖夫. 晶圆级 3D IC 工艺技术 [M]. 单光宝, 吴龙胜, 刘松, 译. 北京: 中国宇航出版社, 2016.

[17] SUSS MicroTec SE. XBS200 wafer bonder; wafer bonding platform for high-volume production [EB/OL]. (2023-09-23) [2023-11-28]. <https://www.suss.com/en/products-solutions/wafer-bonder/xbs200>.

[18] 仪器网. EVG 晶圆键合机 501-阳极键合 [EB/OL]. (2024-01-02) [2024-01-02]. https://www.yiqi.com/product/detail_175605.html.

[19] 中国电子科技集团公司第二研究所. 晶圆键合系统解决方案 [EB/OL]. (2024-01-02) [2024-01-02]. <https://www.ersuo.com>.

[20] 王成君, 杨晓东, 靳丽岩, 等. 红外探测器薄壳杜瓦组件的瞬态钎焊热场分析 [J]. 电子工艺技术, 2021, 42(5): 267-270.

WANG Chengjun, YANG Xiaodong, JIN Liyan, et al. Investigation on time-dependent thermal field in vacuum blazing for thin-shell Dewar components of infrared detector [J]. Electronics Process Technology, 2021, 42(5): 267-270.

[21] 解永强, 靳丽岩, 杨晓东, 等. 基于半导体器件钎焊技术的温度场研究 [J]. 真空, 2021, 58(4): 58-62.

XIE Yongqiang, JIN Liyan, YANG Xiaodong, et al. Finite elements analysis and optimal design for the temperature field of vacuum brazing furnace [J]. Vacuum, 2021, 58(4): 58-62.

[22] 石磊, 解永蓉. 真空热处理炉瞬态传热过程的数值模拟 [J]. 真空, 2013, 50(5): 38-40.

SHI Lei, XIE Yongrong. Numerical simulation of the transient heat transfer process of vacuum heat treatment furnace [J]. Vacuum, 2013, 50(5): 38-40.

[23] 王成君, 杨兆建. 基于 AMS2750E 标准的低温真空焊接设备温度均匀性的实现 [J]. 电子工业专用设备, 2015, 44(10): 42-45.

WANG Chengjun, YANG Zhaojian. Based on standard AMS2750E low-temperature vacuum welding equipment temperature uniformity design implementation [J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2015, 44(10): 42-45.

[24] 田芳. 晶圆叠层 3D 封装中晶圆键合技术的应用 [J]. 电子工业专用设备, 2013, 42(1): 5-7.

TIAN Fang. Application of wafer bonding technology in wafer on wafer 3D package [J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2013, 42(1): 5-7.

[25] 王成君, 胡北辰, 杨晓东, 等. 3D 集成晶圆键合装备现状及研究进展 [J]. 电子工艺技术, 2022, 43(2): 63-67.

WANG Chengjun, HU Beichen, YANG Xiaodong, et al. Current situation and research progress of 3D integration wafer bonding equipment [J]. Electronics Process Technology, 2022, 43(2): 63-67.

[26] 陶文铨. 传热学 [M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2019.

(编辑 亢列梅)