

集成电路高精度晶圆测温技术研究



王光耀¹, 孙建平^{1*}, 李婷¹, 汪洪军¹, 李嘉豪¹, 陈泽川², 高传吉²

1. 中国计量科学研究院, 北京 100029

2. 中国计量大学, 杭州 310018

【摘要】 集成电路从硅片制造、电路设计、晶圆加工、封装直到出厂存在近千道工艺, 温度始终贯穿其中, 温度的精密测量已成为不可或缺的关键技术。针对我国“缺芯少魂”的芯片产业发展困境及集成电路领域对于精密测温的迫切需求, 展开传感器选型、长期稳定性考察及标定方法研究, 发展多通道高精度测温电路技术, 形成测温晶圆标定方法, 研制了一套 33 路有线高精度晶圆温度测量系统。测试结果表明, NTC 热敏电阻温度计能够满足高精度晶圆测温需求; 拟合温度点的选取对于标定结果具有较大影响, 通过不同标定温度点数量及分布的拟合结果比较, 最终选取六点拟合, 实现了 21℃~23℃ 范围内偏差小于 3 mK, 测量不确定度 7.4 mK($k=2$)的结果。

【关键词】 计量学; 集成电路; 晶圆; NTC 热敏电阻; 温度测量; 不确定度

【中图分类号】 TB942

【文献标识码】 A

【文章编号】 2096-9015(2023)04-0077-06

DOI: 10.12338/j.issn.2096-9015.2022.0263

【引用本文】 王光耀, 孙建平, 李婷, 等. 集成电路高精度晶圆测温技术研究 [J]. 计量科学与技术, 2023, 67(4): 77-82, 27.

Research on High-Precision Temperature Measurement Techniques for Integrated Circuits

WANG Guangyao¹, SUN Jianping¹, LI Ting¹, WANG Hongjun¹, LI Jiahao¹, CHEN Zechuan², GAO Chuanji²

1. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

2. China Jiliang University, Hangzhou 310018, China

Corresponding author: SUN Jianping, Email: sunjp@nim.ac.cn

【Abstract】 The process of integrated circuit fabrication spans from silicon wafer manufacturing, circuit designing, wafer processing, packaging to the final product, involving nearly a thousand steps where precision temperature control plays a pivotal role. Given the pressing demand for precise temperature measurements in integrated circuit production and the current challenges faced by China's chip industry, this study investigated sensor selection, long-term stability, and calibration methods. Consequently, a multi-channel high-precision temperature measurement circuit technology was developed and a calibration method for temperature measurement wafers was established. Further, a 33-channel wired high-precision wafer temperature measurement system was constructed. Experimental results demonstrate that the NTC thermistor thermometer can satisfy the requirements of high-precision wafer temperature measurements. Calibration results greatly depend on the selection of fitting temperature points. Through comparison of different calibration temperature point distributions and quantities, a six-point fitting was chosen, achieving a deviation less than 3 mK within a 21℃~23℃ range, and measurement uncertainty of 7.4 mK ($k=2$).

【Key words】 metrology, integrated circuit, wafer, NTC thermistor, temperature measurement, uncertainty

0 引言

自 1974 年第一个晶体管发明, 集成电路的器件

容量和性能便以摩尔定律增长^[1-3], 最终实现每平方厘米上亿晶体管的高度集成。在这飞速发展的集成技术背后, 离不开高精度监测系统, 尤其是晶圆温

收稿日期: 2022-11-04; 修回日期: 2023-03-10

基金项目: 中国计量科学研究院基本科研业务费重点领域项目(26-AKYZD2004-3)。

作者简介: 王光耀(1990-), 中国计量科学研究院助理研究员, 研究方向: 温度计量, 邮箱: wanggy@nim.ac.cn; 通讯作者: 孙建平(1978-), 中国计量科学研究院研究员, 研究方向: 温度计量, 邮箱: sunjp@nim.ac.cn。

度监测,其贯穿着晶圆制作、刻蚀、沉积等集成电路生产全流程^[4-10]。

国际上,集成电路的制造检测设备被美国 KLA-Tencor、Applied Material 和日本的 HITACHI 等行业巨头垄断,其中 KLA 系列有线和嵌入式温度监测产品,占据了高端集成电路制造过程中工艺监控的大半个市场,且以嵌入式销售为主。1998 年美国 NIST 研制了一种用于在快速热处理设备中校准辐射温度测量的晶圆,实现了表面温度测量扩展不确定度小于 2°C ($k=2$)^[11]。2017 年德国利用 SensArray HighTemp-400 晶圆,在实际温度和工艺条件下,对高达 400°C 的晶圆表面温度进行无线测量^[12]。2017 年荷兰 VDL 公司利用 63 个 NTC 传感器组成测温网格系统,该系统在晶圆表面区域的噪声水平仅为 0.3 mK ^[13]。2018 年美国 KLA 研制了 KLA-Tencor SensArray EtchTemp-SE (ETSE) 测温晶圆,该晶圆在 $20^{\circ}\text{C} \sim 400^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的测量精度为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$,实现了实际工况下的静电吸盘 (ESC) 温度测量^[14]。2022 年韩国明知大学电子工程系提出一种无线晶圆片上温度监测系统 (OTMS),实现了快速温度监测并协助修复 ESC 在大气和真空条件下的温度测量^[15]。

国内半导体行业发展较晚,温度监测的产品功能简单,测量水平与国外存在较大差距,相关产品的使用主要依赖进口。随着国际对华禁令的升级,全球新一轮的“芯片荒”来袭造成了产业链中芯片供不应求的问题,我国亟需推进独立自主的芯片研发。与此同时,我国集成电路产业正处于重要的战略机遇期和攻坚期,当前形势下高精度测温晶圆的“卡脖子”现状也是半导体行业国际竞争的结果,其已成为当前我国集成电路产业亟待解决的关键问题。

综上所述,具有较好集成电路基础的国家都已通过发展线上测温晶圆来满足高精度温度测量和控制需求,并建立其计量校准系统。本文拟针对我国集成电路领域对于精密温度测量及量值溯源需求,开展集成电路领域晶圆测温量值溯源技术研究,发展精密测温晶圆系统,满足当前晶圆温度测量重大应用需求。

1 实验装置研制及测试

本文中研制的高精度晶圆测温系统主要包含高稳定 NTC 热敏电阻传感器、多通道温度采集电路、12 英寸晶圆及测温软件四个部分。

1.1 传感器的选型及标定遴选

1.1.1 传感器的选型

温度传感器是指能感受温度并转换成可用输出信号的传感器,通常具有可重复性且随温度规律性变化。虽然温度传感器的种类繁多,却没有一种温度传感器能够同时适用整个温度范围且具备一定的测量精度。针对本文中关注的晶圆测温范围 $10^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$,可考虑的传感器包含:标准铂电阻温度计、薄膜型铂电阻温度传感器、热电偶、石英传感器及 NTC 热敏电阻温度计。标准铂电阻温度计测量精度高,但价格昂贵且体积较大不宜安装在测温晶圆之上;薄膜型铂电阻温度传感器测量精度高、价格较低、体积小、抗振动能力强,但温度系数小,对测温电路的要求极高;热电偶传感器成本较低、体积小,能够测量较大温度范围,但测量精度较低,无法满足晶圆测温需求;石英传感器抗干扰能力强,但响应较慢,无法满足晶圆温度的实时监测;NTC 热敏电阻温度计分辨率高、响应快、体积小、热惯性小、价格低、阻值高且灵敏度高,对测温电路的要求较低,随时间推移传感器元件稳定性不断提升,被广泛应用于高精密测温系统^[16-17]、工业制造^[18]、海洋监测^[19-20]等领域。NTC 热敏电阻温度计的突出缺点为测量温度范围窄(不超过 200°C),非线性效应明显。但对于本文所测量的温度范围 $10^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$,NTC 热敏电阻温度计的上述缺点影响较小,因此本文选取 NTC 热敏电阻温度计作为测温晶圆传感元件。

目前我国自主研发的 NTC 热敏电阻元件已经具备较为优异的传感性能,本文中选取了体积较小的高稳定性热敏电阻作为传感元件。

1.1.2 传感器的标定遴选

NTC 热敏电阻温度计在使用初期稳定性较差,但随着时间的推移,稳定性逐渐提升。实验中每隔一周通过国家基准水三相点装置 (0.01°C , 不确定度 0.16 mK , $k=2$) 和镓熔点装置 (29.7646°C , 不确定度 0.58 mK , $k=2$) 对其阻值漂移进行监测,最终选取半年稳定性优于 4 mK 的传感元件进行标定。所选传感器半年稳定性结果如图 1 所示。

在 $10^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ 温度范围附近,90 国际温标定义的只有水三相点和镓熔点,NTC 热敏电阻的非线性效应决定了定点法无法满足标定需求,因此比较法成为传感元件标定唯一选择。本文中选取的标定仪器设备主要有:标准铂电阻温度计 (SPRT)、ASL F900 测温电桥、6015T 测温电桥、低热电势扫描开

关、均热块(直径 70 mm, 高度 100 mm, 插入深度 70 mm)、大型精密恒温槽(温度范围: 0℃ ~ 50℃, 分辨率: 0.000 1℃, 控温波动度: ≤0.001℃/5 min, 均匀性: ≤0.003℃), 校准系统如图 2 所示。由于均热块具有较好的孔间温度一致性, 测试前将 SPRT 和待测 NTC 电阻元件传感部位置于均热块并放入恒温槽中, 利用 ASL F900 测温电桥测量 SPRT 阻值, 利用 6015T 测温电桥配合低热电势扫描开关依次测量 NTC 热敏电阻元件阻值。

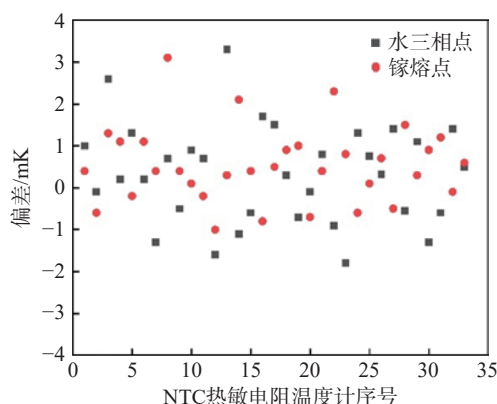


图 1 NTC 热敏电阻半年稳定性结果
Fig.1 Half-year stability results of NTC thermistor

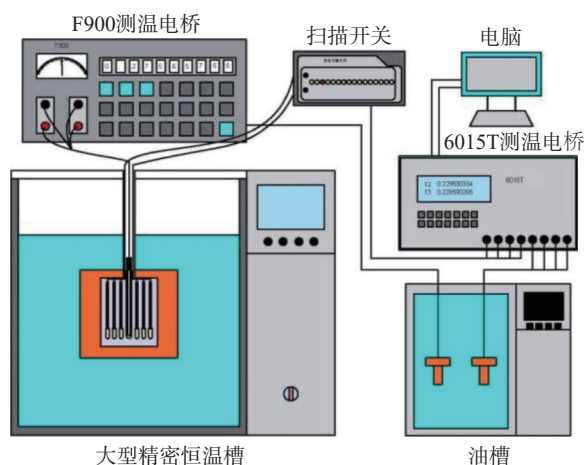


图 2 NTC 热敏电阻校准系统
Fig.2 Calibration system of NTC thermistor

在测量温区 10℃ ~ 30℃ 范围内每隔 3℃ 到 4℃ 取一个校准点, 并在集成电路领域关键温度区间 21℃ ~ 23℃ 范围内每隔 1℃ 取一个校准点, 分批次对传感器进行标定, 每支温度计标定 8 个温度点, 分别为: 9.5℃、13℃、17℃、21℃、22℃、23℃、27℃、30.5℃, 利用不同温度点阻值拟合得出相应的拟合系数, 并将拟合结果与 SPRT 进行比较, 其校准方程如式(1)所示^[21]。

$$\frac{1}{T} = A_0 + A_1 \ln R_T + A_2 (\ln R_T)^2 + \cdots + A_{n-1} (\ln R_T)^{n-1} \quad (1)$$

式中, R_T 为 NTC 热敏电阻温度计在温度 T 时的电阻值; n 为校准温度点的数量; A_0 、 A_1 、 A_2 、 $\cdots$ 、 A_{n-1} 为校准系数。

1.2 温度采集电路研制与测试

1.2.1 温度采集电路研制

高精度测温电路采用模块化结构形式, 按照功能的不同划分成两种不同的硬件模块: 测温模块(2 个)、供电管理模块(1 个)。测温模块通过热敏电阻信号调理电路等完成对感温信号至电压信号的转换, 再经过 A/D 转换器及内总线送入计算机进行电压信号量化处理, 计算机内部软件将量化后的测温信号配合一系列算法, 获取控温点的精确温度数据; 供电管理模块提供产品正常工作所需的二次电源。

1.2.2 采集电路测试

1) 采用温度国家基准镓熔点复现装置对采集电路测温稳定性进行测试, 如图 3 所示。将研制的温度采集电路开机后进行预热, 正确接线后, 调试 33 个工作通道, 保证其工作状态正常。选取已校准的 NTC 热敏电阻温度计(编号: 94)作为参考温度计, 在温度采集电路测试平台界面内输入该温度计校准系数, 并将该温度计放置于镓点炉中, 待镓点温坪出现后进行测试。

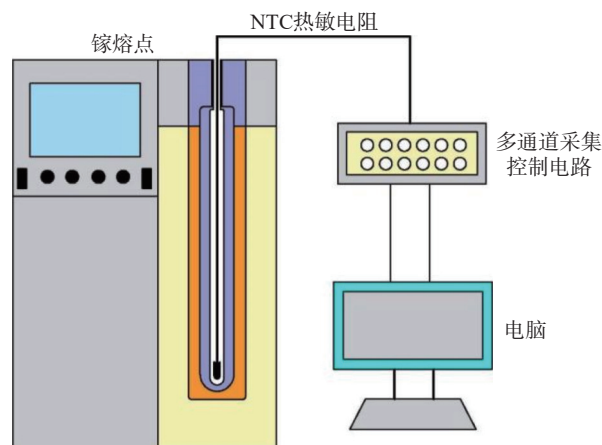


图 3 电路稳定性测试系统
Fig.3 Circuit stability test system

2) 依次将 33 个通道连接 NTC 热敏电阻进行阻值测量, 每个通道测试时间设置为 10 min, 采样频率为 10 Hz, 读取每个通道中该 NTC 热敏电阻在镓点温坪时的阻值, 将阻值换算为温度并与镓熔点温度

(29.7646℃)进行比较,验证二者温度偏差,同时测量电路稳定性。测试结果显示各通道采集的阻值最大与最小值之差均在 $\pm 0.3\Omega$ 之内,转换为温度偏差在 $\pm 2.5\text{ mK}$ 以内。

1.3 传感器粘接与晶圆标定

传感器的排布是获取整个晶圆温度场的关键,通常晶圆边缘处温度场均匀性较差,越靠近中心均匀性越好。本文将12英寸晶圆沿半径方向均匀分为三个区域,按照中心对称加轴对称的方式从边缘到中心依次等间隔排布16支、8支、8支、1支传感器,如图4所示。为保证测量的有效性和传感器的环境一致性,粘接传感器时取用固定胶量粘接传感器,最后将传感器接线统一沿着无传感器区域送出,以消除接线对传感器测量环境的影响。

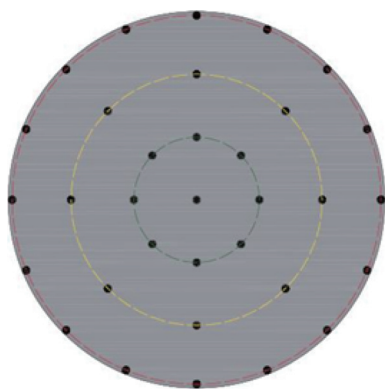


图4 温度传感器分布图

Fig.4 Distribution diagram of temperature sensors

与NTC热敏电阻相同,晶圆标定也需要采用比较法。将待标定晶圆放入标定工装置于精密恒温槽工作区,在待测晶圆旁放置一支SPRT,如图5所示。待SPRT测得温度稳定,21℃~23℃温度点恒温槽稳定性优于1 mK/5 min,21℃~23℃之外温度点恒温槽稳定性优于2.5 mK/5 min,开始系统测量,以减小恒温槽稳定性引入的不确定度,保证校准数据的有效、可靠。此外,在每次开始测试前,测量晶圆测温工装上、下、左、右以及中心位置的温差以确认温度分布均匀性,经过测量该恒温槽工作区均匀性均优于3 mK。

2 实验结果与分析

2.1 NTC热敏电阻温度计校准

国内外对于NTC热敏电阻温度计的校准已有较多研究,但由于NTC热敏电阻的非线性特性使得实现高精度的温度校准难度较大,未形成统一的校

准方法。基于已有研究可知校准点数和校准点的分布对于校准精度有着明显的影响,且要获得较高水平的校准,校准点数通常不少于4到5个校准点^[22-25]。校准点数太少难以满足高精度测量要求,但并非校准点数越多越好,太多的校准点数一方面引起拟合震荡,导致过校准现象,降低测量精度,另一方面也降低校准效率。本文针对10℃~30℃测量范围选取8个温度点9.5℃、13℃、17℃、21℃、22℃、23℃、27℃、30.5℃进行校准,并尝试通过较少的校准点实现较优的校准结果。因为NTC热敏电阻的非线性特性不能够进行较大温差的外推,所以每次选点时将边界点9.5℃、30.5℃包含在内,然后在其中选取其他温度点。根据校准结果的一致性和精度,最终选取9.5℃、13℃、17℃、21℃、27℃、30.5℃六个温度点进行拟合,实现了21℃~23℃范围内优于3 mK的温度偏差。

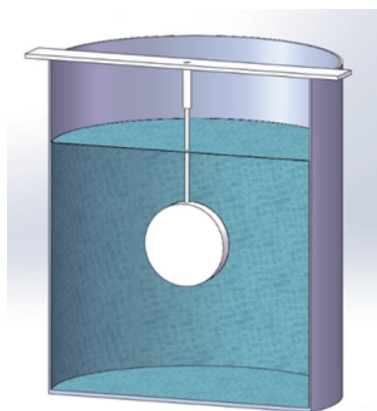


图5 测温晶圆标定示意图

Fig.5 Schematic diagram of temperature

将校准系数输入控制器中,开启测温系统并监测升温过程,如图6所示为22℃时其中一个通道温度随时间变化情况。由图可知,在设备开启后温度迅速上升约10 mK,随后升温速率趋于平缓,温度稳定时波动在 $\pm 2.5\text{ mK}$ 以内。并由NTC热敏电阻阻值大、体积小特征不难得知,自热效应是该温度计迅速升温的主要因素,但目前受到芯片限制,实现低电流测量难度较大,寻求低电流采集电路方案也成为下一步研究的重点。

2.2 不确定度评估

本文研制的高精度晶圆测温系统测量不确定度来源主要包括测温电路,NTC热敏电阻温度计稳定性、重复性,恒温槽稳定性、均匀性以及SPRT校准不确定度,如表1所示。其中多通道精密测温仪测

温稳定性优于 2.5 mK, 按均匀分布计算, 引入的不确定度为 1.4 mK; 恒温槽在工作区稳定性、均匀性优于 3 mK, 按均匀分布计算, 引入的标准不确定度为 1.7 mK; 多次测量最大偏差(21℃~23℃)优于 3 mK, 在 10℃~21℃、23℃~30℃ 优于 30 mK, 按照均匀分布, 重复性分别优于 1.7 mK 和 17.3 mK; SPRT 校准标准不确定度为 0.3 mK; NTC 热敏电阻温度计稳定性优于 4 mK, 引入的不确定度分量为 2.3 mK。经过计算, 该系统的测量不确定度(21℃~23℃)为 7.4 mK($k=2$)。

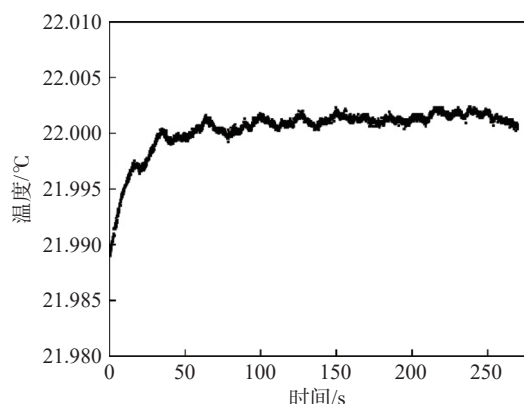


图 6 系统开启后温度随时间变化

Fig.6 Temperature variation over time after system activation

表 1 晶圆测温系统测温不确定度

Tab.1 Uncertainty of temperature measurement in wafer temperature measurement system

不确定度来源	标准不确定度 / mK(21℃~23℃)
多通道精密测温仪	1.4
NTC热敏电阻温度计稳定性	2.3
恒温槽稳定性、均匀性	1.7
多次测量重复性	1.7
SPRT校准	0.3
合成标准不确定度	3.6
扩展不确定度($k=2$)	7.2

2.3 标定结果验证

根据对传感器的校准获得的温度电阻值关系, 并在 10℃、21℃、23℃、30℃ 四个温度点处进行校准结果验证, 在此过程中, 将两个精度优于 1 mK 的 NTC 置于测温晶圆上, 待温度稳定后取两个 NTC 的平均值作为标准, 与晶圆上各传感器进行比较, 结果如图 7 所示。

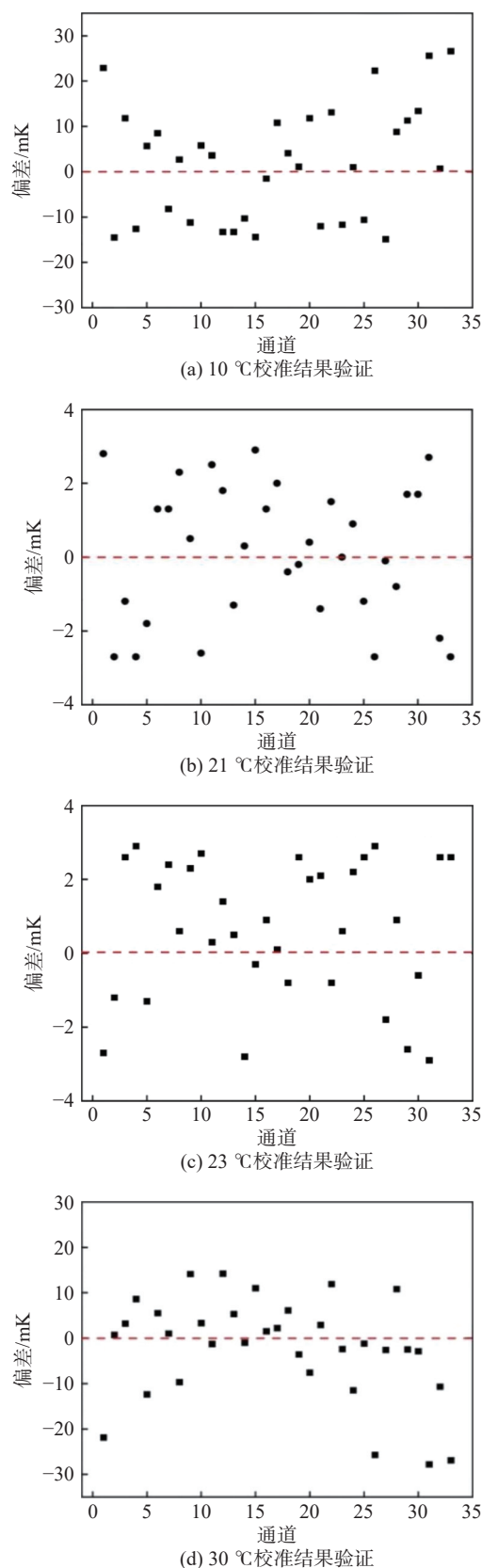


图 7 在 10℃、21℃、23℃、30℃ 温度点校准结果验证
Fig.7 Verification of calibration results at temperature points of 10℃, 21℃, 23℃, and 30℃

测试结果显示,在 21℃ ~ 23℃ 区间内标准偏差小于 3 mk, 10℃ ~ 21℃、23℃ ~ 30℃ 区间内标准偏差小于 30 mk。

3 结论

本文围绕集成电路领域对于精密测温的迫切需求,形成了一套 33 路有线高精度晶圆测温方案,开展传感器遴选、粘接以及测温晶圆系统标定研究,发展集成电路领域晶圆测温量值溯源技术,开展高精度晶圆温度测量系统研制。测试结果表明,所研制的测温电路在镓熔点温坪满足温度偏差不超过 2.4 mK,温度偏差不超过 2.5 mK,稳定性优于 1.4 mK。通过全系统标定,获得校准方程,多次测量最大偏差(21 ~ 23℃)优于 3 mK,在 10℃ ~ 21℃、23℃ ~ 30℃ 优于 30 mK,按照均匀分布,重复性分别优于 1.7 mK 和 17.3 mK。

综上,本文研制的高精度晶圆测温系统可实现 10℃ ~ 30℃ 范围内的实时测量且温度测量不确定度在 21℃ ~ 23℃ 为 7.4 mK($k=2$)。

未来可以从以下几方面继续开展集成电路领域高精度晶圆测温系统研究:

1) 不断提高大型精密恒温槽工作区均匀性和稳定性水平,减小恒温槽引入的不确定度,进一步保证校准数据的有效、可靠。

2) 面对高精度晶圆测温需求,NTC 热敏电阻传感器的自热效应已不容忽视,但受芯片限制难以实现低电流测量,未来通过寻求低电流采集电路方案,同时开展 NTC 热敏电阻传感器自热效应研究,降低传感器自热效应对测量精度的影响。

3) 通过对不同校准温度点拟合结果的分析,不断优化校准温度点选取,形成更科学的晶圆测温校准方案,为未来高精度晶圆测温标定技术提供支撑。

参考文献

- [1] MACK C A. Fifty years of Moore's law[J]. *IEEE Transactions on semiconductor manufacturing*, 2011, 24(2): 202-207.
- [2] WILLIAMS S. What's next? [the end of Moore's law][J]. *Computing in Science & Engineering*, 2017, 19(2): 7-13.
- [3] 魏明, 张军. 一种便携式箱式电阻炉校准装置的研制 [J]. *计量科学与技术*, 2022, 66(12): 50-54.
- [4] HIKAVYY A, KRUV A, VAN OPSTAL T, *et al.* Investigation of C12 etch in view of extremely low temperature selective epitaxial processes[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2017, 32(11): 114006.

- [5] RAHAMAN S Z, WANG I J, CHEN T Y, *et al.* Pulsewidth and temperature effect on the switching behavior of an etch-stop-on-MgO-barrier spin-orbit torque MRAM cell[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2018, 39(9): 1306-1309.
- [6] SCHIAVONE G, MURRAY J, PERRY R, *et al.* Integration of electrodeposited Ni-Fe in MEMS with low-temperature deposition and Etch processes[J]. *Materials*, 2017, 10(3): 323.
- [7] PEJOVIC M M, RISTIC G S, MILOSAVLJEVIC C S, *et al.* Influence of tube wall material type and tube temperature on the recombination processes of nitrogen ions and atoms in afterglow[J]. *Journal of Physics D:Applied Physics*, 2002, 35(20): 25.
- [8] YAMAMOTO H, KURODA H, ITO M, *et al.* Feature profiles on plasma etch of organic films by a temporal control of radical densities and real-time monitoring of substrate temperature[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2011, 51(1R): 16202.
- [9] HUANG P, YANG H. A design method to improve temperature uniformity on wafer for rapid thermal processing[J]. *Electronics*, 2018, 7(10): 213.
- [10] TSAI B K, BODYCOMB J, DEWITI D P, *et al.* Emissivity compensated pyrometry for specular silicon surfaces on the NIST RTP test bed [C]. New York: IEEE, 2004.
- [11] Kreider K G, DeWitt D P, Tsai B K, *et al.* Calibration Wafer for Temperature Measurements in RTP Tools [J]. *Characterization and Metrology for ULSI Technology*, 1998: 303-309.
- [12] Engelmann J, Chu D, Dupraz T, *et al.* Measuring the wafer temperature in CVD tools using the wireless SensArray High Temp-400 wafer [J]. *IEEE ASMC*, 2017: 161-164.
- [13] Mierden B, Tas M, Lof J, *et al.* ITRS roadmap is pushing wafer handling to milli-Kelvin performance [J]. *International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology*, 2017: 461-462.
- [14] Fang F, Vaid A, Vinslava A, *et al.* Correlation study of actual temperature profile and in-line metrology measurements for within-wafer uniformity improvement and wafer edge yield enhancement[J]. *SPIE Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXXII*, 2018, 10585: 1-6.
- [15] Kim J H, Koo Y, Song W, *et al.* On-Wafer Temperature Monitoring Sensor for Condition Monitoring of Repaired Electrostatic Chuck[J]. *Electronics*, 2022, 11(880): 1-10.
- [16] 范寒柏, 谢汉华. 基于 NTC 热敏电阻的三种高精度测温系统研究 [J]. *传感技术学报*, 2010, 23(11): 4.
- [17] 于丽丽, 王剑华, 戈伟群. NTC 热敏电阻器在高精度温度测量中的应用 [J]. *传感器技术*, 2004(12): 75-77.
- [18] Cheng A, Zhang Y, Zhao Y, *et al.* Design of Temperature Measurement System for Electric Vehicles Air Conditioning[J]. *International Core Journal of Engineering*, 2020, 6(1): 236-242.
- [19] 李婷, 汪洪军, 孙建平, 等. 海洋用 NTC 热敏电阻温度计校准方法探索 [J]. *计量科学与技术*, 2021, 65(5): 55-61.
- [20] Joung W, Gam K, Pearce J V. Pressure dependence of the reference deep-ocean thermometers[J]. *Metrological Applications*, 2020, 27(1): e1870.

- [50] 赫明钊, 林百科, 李建双. 基于双波长频率梳的绝对测距系统研究[J]. 计量学报, 2017, 38(S1): 51-55.
- [51] 林百科, 曹士英, 袁小迪, 等. 赫兹相对线宽的双光梳绝对距离系统[J]. 计量科学与技术, 2021(2): 44-48.
- [52] Zhu Z, Xu G, Ni K, *et al.* Synthetic-wavelength-based dual-comb interferometry for fast and precise absolute distance measurement[J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 5747-5757.
- [53] Zhu Z, Ni K, Zhou Q, *et al.* Two-color phase-stable dual-comb ranging without precise environmental sensing[J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 4660-4671.
- [54] Zhou S, Lin C, Yang Y, *et al.* Multi-pulse sampling dual-comb ranging method[J]. *Optics Express*, 2020, 28(3): 4058-4066.
- [55] Fellinger J, Winkler G, Aldia P C, *et al.* Simple approach for extending the ambiguity-free range of dual-comb ranging[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(15): 3677-3680.
- [56] Jiang R, Zhou S, Wu G. Aliasing-free dual-comb ranging system based on free-running fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2021, 29(21): 33527-33535.
- [57] 容驹驹. 双飞秒激光频率梳重复频率锁定技术研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2022.
- [58] 武腾飞, 韩继博, 白毓, 等. 双光梳绝对距离测量实验研究[J]. 计测技术, 2022, 42(3): 50-55.
- [59] Han S, Kim Y J, Kim S W. Parallel determination of absolute distances to multiple targets by time-of-flight measurement using femtosecond light pulses[J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 25874-25882.
- [60] Hu D, Wu Z, Cao H, *et al.* Dual-comb absolute distance measurement of non-cooperative targets with a single free-running mode-locked fiber laser[J]. *Optics Communications*, 2021, 482: 126566.
- [61] Nguyen Q K, Kim S, Han S H, *et al.* Improved Self-Calibration of a Multilateration System Based on Absolute Distance Measurement[J]. *Sensors*, 2020, 20(24): 7288.
- [62] Zhou S, Le V, Xiong S, *et al.* Dual-comb spectroscopy resolved three-degree-of-freedom sensing[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(2): 243-251.
- [63] Liu Y, Xia W, He M, *et al.* Strategies of precision enhancement for dual-comb time-of-flight distance measurement with nonlinear detection by numerical simulation[C]. SPIE, 2021.
- [64] Liu Y, Xia W, He M, *et al.* Experimental realization and characterization of a two-color dual-comb system for practical large-scale absolute distance measurements[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 151: 106900.
- [65] 夏文泽, 刘洋, 赫明钊, 等. 双光梳非线性异步光学采样测距中关键参数的数值分析[J]. 物理学报, 2021, 70(18): 53-62.
- [66] Liu Y, Xie Z, He M, *et al.* Preliminary Investigations of Absolute Distance Measurement by the Dual-Comb System with a Fiber Interferometric Scheme[C]. Singapore, 2022.
- [67] 刘洋, 赫明钊, 谢志奇, 等. 一种多轴全光纤双光梳大尺寸绝对测距系统: CN113805189B[P]. 2022-06-17.
- [68] Xie Z, Liu Y, He M, *et al.* Investigations on the non-ambiguity range extension of dual-comb ranging by repetition range variation[C]. SPIE, 2022.
- [69] Liu Y, Röse A, Prellinger G, *et al.* Combining Harmonic Laser Beams by Fiber Components for Refractivity-Compensating Two-Color Interferometry[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(7): 1945-1952.
- [70] Liu Y, Li J, Li J, *et al.* Proof-of-concept study of the virtual optical scale bar by the pulse-to-pulse interferometry[J]. *Optics Express*, 2022, 30(2): 2063-2077.
- [71] Liu Y, Yang L, Guo Y, *et al.* Optimization methods of pulse-to-pulse alignment using femtosecond pulse laser based on temporal coherence function for practical distance measurement[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 101: 35-43.
- [72] Liu Y, Lin J, Yang L, *et al.* Construction of traceable absolute distances network for multilateration with a femtosecond pulse laser[J]. *Optics Express*, 2018, 26(20): 26618-26632.

本文编辑: 李润芝

(上接第 82 页)

- [21] Guang Liu, Liang Guo, Chunlong Liu, *et al.* Evaluation of different calibration equations for NTC thermistor applied to high-precision temperature measurement[J]. *Measurement*, 2018, 120: 21-27.
- [22] White D R, Hill K, del Campo D, *et al.* Guide on secondary thermometry: Thermistor thermometry[R]. Bureau International des Poids et Mesures: Paris, France, 2014.
- [23] 梁亚星, 王秀峰, 金晓雪, 等. 氧化铝陶瓷材料电阻率精确测试方法[J]. 计量科学与技术, 2022, 66(1): 22-25.
- [24] 李超, 曾麟, 陈岳飞, 等. 恒温式量热仪校准精密温度计的可行性研究[J]. 计量科学与技术, 2022, 66(7): 38-44.
- [25] 王海涛, 文萌, 董亮, 等. 恒温槽温度梯度实验研究[J]. 计量科学与技术, 2021, 65(10): 50-53, 5.

本文编辑: 霍祎炜