

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006961

集成电路制造过程中的晶圆温度监测技术*

贾镜材, 钟业奎, 张泽展, 姜晶, 王超

(电子科技大学电子科学与工程学院 成都 610000)

摘要:随着集成电路的不断发展,低功耗与小面积逐渐成为芯片设计中的重要指标,促使形成电路的器件尺寸不断降低。在半导体芯片制造过程中,越小的器件尺寸对工艺过程中温度控制的精度要求越高,晶圆温度的轻微偏离和高于1%的温度不均匀性将会直接影响最终产品的良率。为实现温度与温度场分布的高精度控制,需要对其进行更为精确的预先检测与实时获取,集成电路制造中的晶圆温度监测技术应运而生。围绕接触式和非接触式两大测温技术分支,介绍了监测温度范围为0℃~1300℃的晶圆温度监测技术原理。本文基于原理分析各技术所具有的优势与仍然不能满足的测温技术要求,追踪各测温技术的国内外发展现状,展望了未来晶圆温度监测技术的发展方向。

关键词:温度监测;晶圆;接触式;非接触式

中图分类号: TN3 TN37 TH7 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.10 510.30

Wafer temperature monitoring technology in integrated circuit manufacturing process

Jia Jingcai, Zhong Yekui, Zhang Zezhan, Jiang Jing, Wang Chao

(School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610000, China)

Abstract: With the continuous development of integrated circuits, low power consumption and small area have gradually become the important specifications in chip design, which promotes the continuous reduction in the size of the devices that constitute the circuit. In the semiconductor chip manufacturing process, smaller device size has higher requirements for temperature control accuracy in the process. The slight deviation of the wafer temperature and the temperature non-uniformity higher than 1% will directly affect the yield of the final product. In order to achieve high-precision control of temperature and temperature field distribution, more accurate pre-detection and real-time acquisition are necessary, which pushes the wafer temperature monitoring technology in the integrated circuit manufacturing come into being. Focuses on the two main directions of contact and non-contact temperature measurement technologies, introduces the principles of the temperature monitoring technologies applied in the temperature monitoring range of 0℃~1300℃, based on the principles analyzes the advantages and drawbacks of various technologies in detail, keeps track the development status of various each temperature measurement technologies both at home and abroad, and looks forward to the future development of wafer temperature monitoring technology.

Keywords: temperature monitoring; wafer; contact; non-contact

0 引言

自1947年第一块晶体管发明以来,半导体器件就进入了飞速的发展时期,随之而来的是第三次信息

革命的到来。集成电路上可容纳的元器件数目遵循着摩尔定律大约每隔18~24个月增加1倍,性能也伴随着提升1倍^[1-4]。而器件性能提升的背后,不仅要求出色的半导体材料,更要求有优秀的半导体制造设备。这些精密复杂的设备贯穿了整个半导体产业

收稿日期:2020-09-29 Received Date: 2020-09-29

* 基金项目:国家自然科学基金(61727818, 51672037)、国家重点研发计划(2017YFC0602102)、四川省国际科技合作与交流研发项目(2019YFH0009)资助

链,从提纯硅到硅柱切片再到抛光、光刻、沉积、刻蚀等,无不有这些设备的身影^[5-8]。它们在微米甚至纳米级操控尺寸形成电极、导电沟道、金属连线等一系列关键结构。正是有这些设备,才让厘米见方的面积上集成上亿个晶体管成为可能。而同时,晶圆的温度监测是这些半导体设备必备的功能,因为不论是从晶圆片的产生,还是在晶圆片上进行刻蚀、沉积,还是在电路形成后对温度分布的监测,温度都是一个非常重要的参数^[9-25]。

具体而言,这种重要性体现在在半导体制造过程中,正在处理的硅晶片的温度控制通常对于产生具有高重复性器件的所需特性是至关重要的^[26]。例如,在反应离子刻蚀(reactive ion etching, RIE)工艺中,将由等离子体激活的离子被电场加速来实现各向异性蚀刻,温度的不均匀可能导致蚀刻速率不稳定,以致在蚀刻轮廓中产生缺陷,降低产品产量和可靠性;在化学气相淀积(chemical vapor deposition, CVD)中,温度的精确控制对于薄膜的沉积质量具有重要的影响。中国科学院半导体研究所的王莉莉等^[27]通过实验研究了生长温度对MOCVD外延生长InGaND的影响,结果发现生长温度的降低会恶化InGaN的晶体质量;在快速热处理过程(rapid heat treatment, RTP)中,晶圆温度的均匀性和可重复性是扩展其应用范围的主要障碍^[28]。温度的非均匀性不仅会导致所注入离子的非均匀性激发,还会造成多余的热应力,从而形成晶体缺陷,影响加热元件的性能^[29];在影响线宽的关键过程-光刻序列中的曝光后烘烤(post-exposure bake, PEB)中,用于深紫外线(deep ultraviolet, DUV)光刻的放大抗蚀剂对温度的变化非常敏感。根据《国际半导体技术路线图》,到2010年,PEB过程温度变化导致关键尺寸的变化为一纳米每摄氏度,因此控制整个过程中的晶圆表面空间温度分布是非常重要的^[30]。可以说,温度因素基本贯穿了整个半导体制造过程,温度的轻微非期望波动就可能造成整个制造过程的失败,而为了控制像温度这样的过程变量,其测量必须比所需的控制更为精确。如果测量分辨率为 $\pm 1^\circ\text{C}$,则控制效果将不会优于 $\pm 1^\circ\text{C}$,通常会降低2~10倍^[31],所以目前的半导体设备中温度的精确测量技术是必不可少的^[32-33]。

本文介绍了几种应用于晶圆的测温技术,重点介绍了热电偶测温、辐射测温以及声学法的测温原理及其研究进展。首先介绍了接触式的测温方法,包括电阻式、热电偶式、荧光测温、晶体管测温。其次介绍了非接触式的测温方法,包括辐射测温、红外透射测温、反射率测温、原位椭圆偏振法、激光干涉法、声学法、红外成像法。最后对晶圆的测温技术进行总结和展望。

1 接触测温方式

1.1 电阻式

基于电阻式的测温方法主要通过硅表面上沉积一层合适的薄膜,例如Co^[34]和Ti^[35],测量晶圆表面的薄膜电阻来获得其映射的晶圆温度。具体而言这种映射关系可以表达为在不同的温度下生成不同的反应物。例如Co沉积到晶圆上,其反应物随着温度的上升将会发生Co₂Si(350°C)到CoSi(500°C)再到CoSi₂(>550°C)的演变。薄膜电阻也随着反应物的变化而变化,在初期Co向CoSi转变时,薄膜电阻逐步上升,后期CoSi₂出现时电阻开始下降,这种映射关系如图1所示。

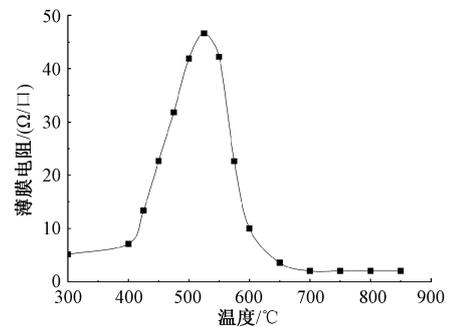


图1 Co-Si反应产物的薄层电阻与温度的关系
Fig. 1 Sheet resistance of Co-Si reaction product versus temperature

从图1可以看出,这种映射不同于函数的单一映射关系,在实际测量时可以单取一半即300°C~550°C。文献[34]使用这种方法实现了在物理气相淀积(physical vapor deposition, PVD)系统中的晶圆夹持工具传热性能的分析。

利用电阻与温度的映射关系实现温度的测量,从原理来讲十分简单,但是实际测量时需要注意晶圆表面沉积物的形貌和质量,比如沉积Ti时需要用RCA刻蚀预清洁晶片,再用氢氟酸蚀刻,接着沉积厚度为1000 Å的钛,这个过程中还需要确保最初的薄层电阻约为6.3 ohms/square。可以看到这种方法的前期准备较为繁杂,实时性也比较差,它只能通过将前期制备的测试晶圆置于与实际产品晶圆相同的工艺环境下收集温度信息,进而推算产品晶圆的温度。还需要注意的是,由于晶圆表面上沉积了不同于Si的物质,测试晶圆表面性质发生了变化,这将导致晶圆的发射率改变,在实际加热系统中,测试晶圆的温度将可能由于不同的发射率而不同于产品晶圆,因此这种方法在较为精确的温度测量时,需要处理环境的发射率是独立的。

1.2 热电偶式测温

当有两种不同的导体或半导体构成一个回路,其两端相互连接时,如果两结点处的温度不同,回路中将产生一个电动势,该电动势的方向和大小与导体的材料及两结点的温度有关^[36]。由这两种不同材料构成的回路称为热电偶。回路中产生的电动势由材料的接触电动势和温差电动势组成,当材料确定后,具体的函数关系可以通过两接触点温度 t 和 t_0 给出:

$$\begin{aligned} E_{AB}(t, t_0) &= f(t) - f(t_0) \\ E_{AB}(t, t_0) &= f(t) - C = f(t) \end{aligned} \quad (1)$$

通过这一关系可知,通过固定冷端的温度 t_0 ,热电动势 $E_{AB}(t, t_0)$ 将只随热端,即测量端的温度变化而变化,通过测量热电动势就可以实现测温的目的^[37]。

基于热电偶的测温是一种比较传统的测量方法,同时也是发展非常成熟的测温方法之一,利用热电偶实现晶圆温度的测量早已有研究^[38-41]。在实际使用时,温度传感器可以通过在晶圆表面挖沟槽,将测温点埋入,也可以使用焊接或者高温胶粘贴的方式固定。这种测温的好处是可以测量较高的温度,在一些高温环境中能够应用,但是它也存在一些明显的缺点,比如热电偶与晶圆片之间的连接存在一定的缺陷,其结热阻取决于接触点的形状和压力;将其运用在等离子体刻蚀过程中,离子轰击热电偶会产生杂质;热电偶难以与晶圆达到热平衡;热电偶不透明,在测量点产生阴影或冷点;热量沿着引线传导,从而改变了基板被测部分的温度、气密性,引入污染等^[28]。针对上述问题,研究人员提出了一些解决方法,例如采用耐高温的线路软板解决气密性失配;在传感器表层涂敷保护层或者在其表面加盖板以保护传感器免受等离子体腐蚀;在传感器与晶圆接触部分设置一个小的充满气体的狭缝以提高传热^[42],如图 2 所示。

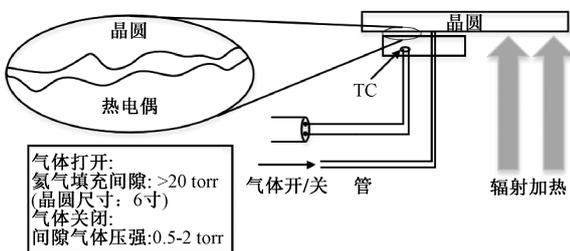


图 2 晶圆和探针之间的缝隙

Fig. 2 The gap between the wafer and the probe

就技术层面来讲,热电偶温度传感器是非常简单的。基于此,国内大多数晶圆温度测量产品都采用这种方法,主要包括冠辉技控有限公司和昆山崧启温控设备科技有限公司。冠辉技控有限公司使用的热电偶

类型是 K 型热电偶,其可测量的温度范围是 $-40^{\circ}\text{C} \sim 800^{\circ}\text{C}$ 。昆山崧启温控设备科技有限公司主要的设备类型有 K 型 ($0^{\circ}\text{C} \sim 600^{\circ}\text{C}$)、T 型 ($0^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$) 和 R 型 ($0^{\circ}\text{C} \sim 1100^{\circ}\text{C}$)。国外的一些低端产品也采用了同样的技术比如 KLA 的 Process Probe 1 530、1 630、1 730、1 840 等。

1.3 荧光测温

荧光测温是利用激发源引起荧光发光物质发光,通过光纤探测荧光的发光强度或者发光衰减时间进行温度的测量。早在 1987 年 I Hussla 等^[43]就研究了应用于晶圆表面的荧光测温技术,他们利用基于磷掺杂的 $\text{LaO}_2\text{S}:\text{Eu}$ 荧光温度传感器实现了硅在氟离子蚀刻过程中温度的测量。这种传感器固定在光纤链路的一端,光纤作为传输路径,两者为不同的物质。在后续的研究中,光纤可以使用荧光材料制作,形成光纤温度传感器。2001 年 Renken 等^[44]提出了一种涉及用于温度表征和校准的集成晶片温度测量设备。他们将利用荧光制作的光纤温度传感器放置于晶圆表面的凹槽中,实现了温度传感器与晶圆的集成。通过这种集成,他们能够将传感器外部厚的绝缘材料剥离,以达到传感器与晶圆良好的热接触,进而能够有效解决传统的光纤探针测量温度不准确的问题。该装置还通过在凹槽内表面镀上陶瓷薄膜并涂上一层反射层来保护传感器免受腔室内高温以及等离子体的腐蚀,同时还提高了传感器的精确度以及灵敏度。

集成后的晶片温度测量设备需要将光纤从处理腔室中引出来,但是松散固定的传感器引线通过晶圆表面将不受衬底的热量沉积,并且被离子轰击过度加热会缩短其寿命并导致表面降解。为此, Renken 等^[44]通过光纤耦合将信号从腔室内部引出到外部,避免了热量的传递以及等离子体的腐蚀,如图 3 所示。但是这种测温方式依旧是有线式的,需要在凹槽表面覆盖一层不透明的盖板,用来保护光纤。同时它对被测物体的损害比较大,只能实现对目标的单点测量,如果想要实现对面测量,还需要开更多的凹槽,这无疑增加了系统的复杂程度,对晶圆的损害也进一步增加。

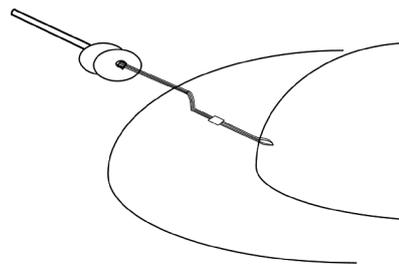


图 3 用于晶圆上的光纤温度传感器

Fig. 3 Optical fiber temperature sensor used on the wafer

荧光测温技术相比基于热电偶的温度测量有其独特的优势,比如这种技术的真空兼容性和对等离子体环境的稳定性使其能够在极端环境中获得极好的应用,同时该技术还具有快速(每次测量 0.31 s)光度测量和内在校准^[43],但是这种技术也存在价格昂贵、测温范围窄(-100℃~300℃)等缺点。

1.4 晶体管测温

晶体管测温技术是利用 PN 结电压随温度的依赖特性,2017 年 Chuang 等^[45]在其专利文章中介绍了这种方法,如图 4 所示。

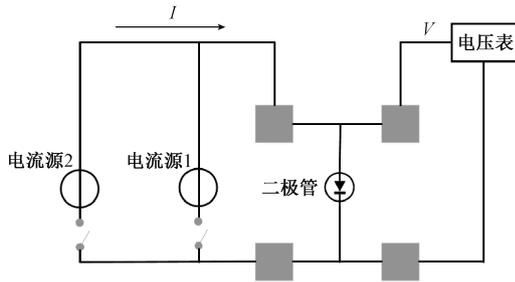


图 4 二极管测温电路

Fig. 4 Diode temperature measurement circuit

电路中使用的热传感器由双极结型晶体管构成,具体而言,结型晶体管基极与发射极所构成的 PN 结的电压与温度具有以下关系:

$$\Delta V_{BE} = \frac{KT}{q} \times \ln\left(\frac{I_{C1}}{I_{C2}}\right) \quad (2)$$

式中: V_{BE} 是二极管电路的带隙电压; K 是玻尔兹曼常数; T 是开氏温度; q 是电子上的电荷; I_{C1} 和 I_{C2} 是两个不同的电流。这种热传感器可以放置在晶圆上的任何位置,它具有比探针更好的精度,允许快速确定局部温度而无需稳定。热传感器还放宽了电压-频率(V2F)和 $\Sigma-\Delta$ 模数转换器($\Sigma-\Delta$ ADC)传感电路中常见的微调电路的精度和失配要求。

这种测温方式类似于 1.3 节所介绍的热电偶,只是温度传感元件换成了晶体管,不同于热电偶会在晶圆上引入扩散杂质,由于晶体管是与晶圆兼容的,它不会在晶圆上带来额外的杂质,对晶圆的破坏也相对较小。

1.5 小结

上述的接触式测温方法除去 1.1 节介绍的利用薄膜电阻外,都是运用成熟的温度传感器来实现晶圆的温度监测,它们都不能直接运用于晶圆的现场温度测量中,只能通过生产和产品晶圆几乎相同的测试晶圆来实现间接的温度监测,例如可以使用测试晶圆收集在刻蚀整个过程中的温度信息,分析各个关键节点的温度变化,利用这些结果优化工艺条件,加强温度控制。

目前利用薄膜电阻实现晶圆温度的测量还未商业化,主要原因有以下几点:1)可靠性有待商榷。如今高端的大规模集成电路制造工艺过程中,反应气体多种多样,淀积的薄膜在工艺腔中可能生成预期之外的产物,进而影响测量结果;2)实用性不高。目前大多数的工艺腔中发射率都不是独立的,这也就意味着测试晶圆和产品晶圆由于发射率不同而导致的附加辐射热量不同,最终在相同工艺下两者的温度也将不一样;3)重复利用率不高,利用这种方法生产的测试晶圆可能在使用一次后就需要重新加工一遍,使得上面的沉积物变得纯净,进而满足测试要求。相反,利用成熟的温度传感器来实现晶圆温度的测量,在市场上比较常见,但是这些方法具有与 1.2 节介绍的热电偶共通的问题,虽然在该节中提出了许多解决办法,但是在如今制程愈发先进,工艺条件要求更为苛刻的情况下,这些改善都难以满足要求。目前有一种解决办法能够有效缓解这些问题,即将测温元件和后续的温度信息处理等电路一并嵌入到晶圆内。这种方法已经被应用于 KLA 公司的一系列产品,通过将温度传感器覆盖整个晶圆表面,整合每个传感器的温度数据,就能够得到晶圆表面的温度场。这一类特制的晶圆由 SensArray 公司(现被 KLA 收购)生产制造,在其内部不仅集成了多个传感器,同时还包括温度处理电路,电池,信号接受/发出电路等模块^[46]。它的优势是在硅晶圆内部集成了众多的传感器的同时依旧能保证晶圆表面极高的平整度。

KLA 生产的该类晶圆已经被用来实现高端集成电路制造过程中的腔室的匹配、监控晶片表面温度的均匀性、提高晶片边缘成品率等^[47-48]。其中,腔室匹配是由于在刻蚀、化学气相沉积等过程中,晶圆的温度不断变化,为了防止由于背面加热导致晶圆温度过高或者由于离子轰击导致晶圆表面部分温度过高,需要对设备有一个预先的匹配。这种匹配是整个处理过程的匹配,利用特制晶圆收集到的温度数据,以此表征该晶圆是否适合在该腔室和该工艺条件下处理。KLA 基于此的产品(如图 5 所示)有:Etch Temp 系列(实时等离子体刻蚀晶圆温度测量系统,测温范围 20℃~140℃,适用范围:介电等离子体刻蚀、导体等离子体刻蚀、离子注入);High Temp-400(实时薄膜沉积晶圆温度测量系统,测温范围 200℃~400℃,适用范围:薄膜沉积);Scanner Temp(实时扫描晶圆温度测量系统,测温范围:0℃~24℃,适用范围:光刻扫描仪);Integrated Wafer(实时光刻晶圆温度测量系统,测温范围:15℃~145℃,适用范围:光刻显影曝光后烘烤);Wet Temp-LP(实时湿法工艺晶圆温度测量系统,测温范围 15℃~140℃,适用范围:湿法刻蚀、湿法清洗)。

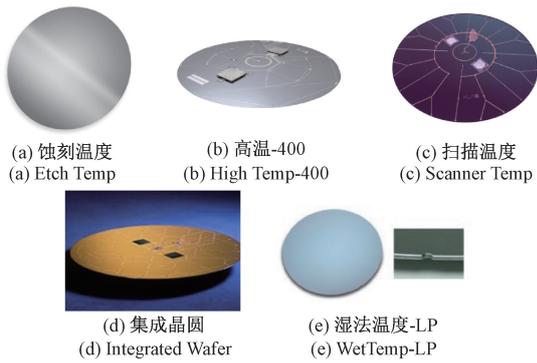


图 5 KLA 各类产品

Fig. 5 Various products of KLA

虽然这种方法解决了一些问题,它对于早期腔室开发均匀性评估和传感器校准具有显著效果,并获得了一定的成功,但不适用于旋转晶片或器件制造期间的实时控制^[28],同时将外部电路引入到晶圆中也将导致其测量的最高温度受到限制,可重复使用的时间也较短。目前 KLA 此类产品最高温度仅为 400℃ 左右,可重复使用的时间不超过 15 h。

本文课题组目前在接触式的晶圆温度测量方向稳步前进。基于国内目前没有与 KLA 相比拟的同类产品,将方向定在了与 KLA 相同的嵌入式的测试晶圆,较高的耐温和长的使用寿命将是后续的主要研究方向。

2 非接触测温方式

2.1 辐射测温

辐射测温基于普朗克黑体辐射定律,在物理学中,任意温度 T 下,从一个黑体中发射出的电磁辐射的辐射率与频率彼此之间的关系,其数学表达式为:

$$M_\lambda = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \quad (3)$$

式中: M_λ 为黑体光谱辐射度,其单位为 W/m^3 ; C_1 为第一辐射常数,值为 $3.7419 \times 10^{-16} W \cdot m^2$; C_2 为第二辐射常数,值为 $1.43879 \text{ cm} \cdot K$; λ 为光谱辐射的波长,单位为 m ; T 为黑体的热力学温度,单位为 K ^[49]。结合维恩位移定律^[50]可以得出一个非黑体的实际辐射体,整个波长范围的辐射出射度表示为:

$$M = \varepsilon \delta T^4 \quad (4)$$

式中: $\varepsilon = \left[\int_0^\infty E_\lambda M_\lambda d\lambda \right] / \delta T^4$, 是光谱发射率的平均效果,称为辐射体的发射率; δ 称为黑体辐射常数,其值为 $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ 。从式(4)可以看出,通过测量物体的辐射出射度,就能够计算出物体的温度值。

利用热辐射实现晶圆温度的测量已有大量研究^[23-25,51],目前应用较为广泛的辐射高温计使用柔性的光导纤维将收集的光从刚性蓝宝石光导管传输到光电探测器和电子仪器。虽然这种技术具有测量精度高、响应速度快,以及能够实时在线监测等优点,但也存在许多技术上的挑战,如晶圆透射率变化引起的背景噪声涨落、热源发射与腔体反射引入的杂散光、低温下晶圆热辐射难以检测与发射率的未知或变化等^[52-56]。

在众多的挑战中,晶圆发射率的未知或变化最为关键与复杂。晶圆发射率的变化受温度、掺杂剂、表面粗糙度、薄膜叠层和表面器件结构等^[57]多种参数耦合影响,这些参数变化是在测温过程中未被考虑的(测温过程中,计算目标温度时,发射率将假定为常数),也就导致测量结果将会存在较大的误差。目前,针对这一技术挑战主要有两种解决思路,一是考虑引入发射率的变化来消除这种误差,即先测定物体的发射率,然后将其带入到辐射公式中进行计算^[52,58],或者寻求发射率不变的先决条件,在该限定条件下进行温度测量。2011 年来自东洋大学的 Iuchi 等^[59]提出了一种基于发射率不变的情况下的辐射测温方法。他们首先通过理论建模来讨论了这种情况是否存在以及存在的条件,如图 6 所示。

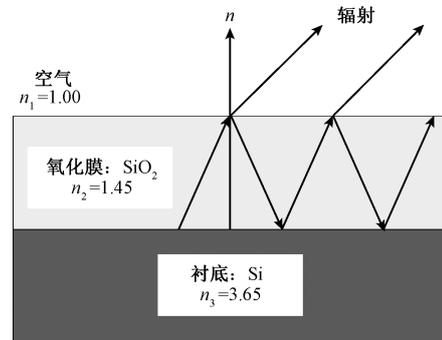


图 6 处理室晶圆模型

Fig. 6 Processing chamber wafer model

本文理论计算在 $\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$ 条件下,原 p 偏振光的发射率可以简化为:

$$\varepsilon_p(\theta_1) = 1 - r_{23p}^2 \quad (5)$$

此时发射率基本为一常数,不会随着晶圆的厚度的改变而改变, r_{23p} 为氧化层和晶圆表面之间的 p 偏振光的反射振幅,同时 θ_1 为布鲁斯特角,计算结果为 55.4° ^[60]。随后他们根据这种理论搭建了实验设备并进行了实验验证,如图 7 所示,最终的结果能够很好地与理论相匹配。

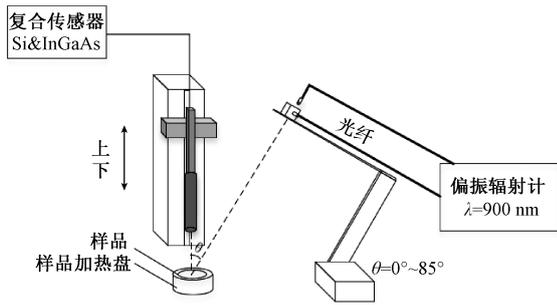


图7 实验结构

Fig. 7 Experiment structure diagram

1991年由 Schietinger 等^[61]所提出的波纹技术能够实时地测量晶圆的发射率,用以实时地矫正辐射公式。该技术原理是通过给加热灯源施加交流电,其辐射出去的辐射能量是具有波动性的,而由晶圆反射回来的辐射是带有温度信息的具有波动性的能量,两个能量变化值的比值为晶圆表面的反射率即(如图8所示):

$$p(\text{reflectivity}) = \frac{\Delta I_w}{\Delta I_L} \quad (6)$$

再通过基尔霍夫定律: $1-p=\varepsilon$ 可以计算得到发射率为:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\Delta I_w}{\Delta I_L} \quad (7)$$

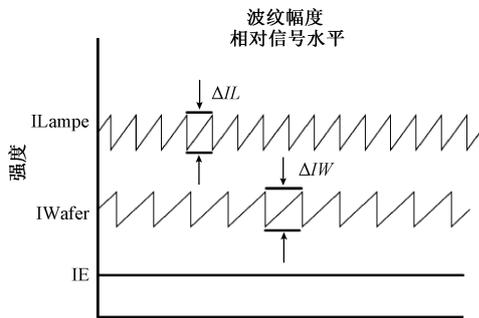


图8 波纹技术图解

Fig. 8 Ripple technology illustration

通过这种方法可以实现在高温段误差不超过 2℃。另一种办法是利用多波段辐射测温法,通过算法消除发射率的影响,缺点是这种测温方法结构复杂,数据量大,计算难。

在利用辐射实现对晶圆的温度测量时,通常会出现一些问题,比如在进行生长工艺的过程中,由于晶圆的温度跨越范围大,单波长辐射高温计难以应对全量程的温度检测,因此需要多个波段的协同。基于此,作者所在的课题组早在 2003 年就瞄准第 3 代半导体生长过程中的温度监控,提出了多波长协同检测及自校准的方法,与北京智朗芯光科技有限公司合作研发第 3 代半导体材料生长的高精度多参数在线监测装备,其主要原理如图 9 所示。

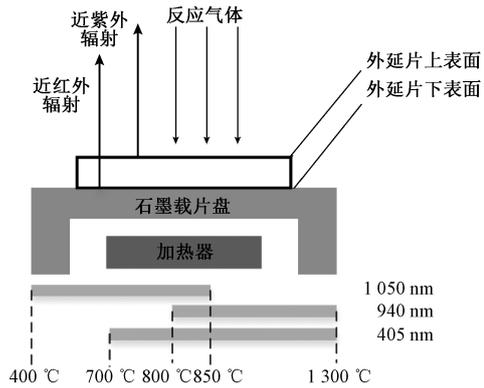


图9 多波长协同

Fig. 9 Multi-wavelength synergy

课题组通过实时测量外延片的 405 nm、940 nm、1 050 nm 多个波长区域的热辐射强度,如图 9 所示,实时解析相应波段的热发射率,并对其进行实时修正,接着依据黑体辐射定律同步获取外延片表面与托盘温度信息,能够为工艺反馈与控制提供有力的保障。基于多波长协同的热发射率补偿辐射测温技术,结合多个敏感波段协同算法设计,优化权重分析,可以有效地拓宽测温区间和应用范围,并进一步提高测量精度,其最终的产品测温范围扩展到 400℃~1 300℃,精度为±1.5℃。

2.2 红外透射测温

利用红外透射测温法可以实现在半导体加工过程中原位衬底温度的测量。该技术的原理是透过材料的 IR 光的波长与温度之间具有一定的关系,即在不同的温度下,辐射波长的透过率不同。基于此,2000 年 Ni 等^[62]提出了一种用于晶圆表面的快速红外测温技术,其结构如图 10 所示。

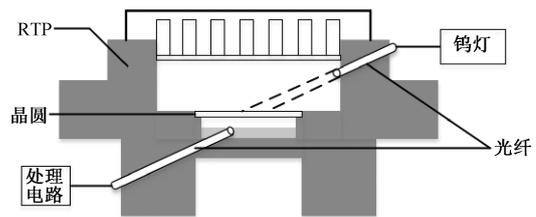


图10 透射测温结构

Fig. 10 Transmission temperature measurement structure

该结构通过光纤将外部钨灯发出的光引入处理腔室中,接着在晶圆的背面放置接受光纤,通过外部的处理电路分析透射光。这种装置的优点包括紧凑和简单的设计,快速响应,高灵敏度和实时温度测量。而且该测温系统易集成到商业处理室设备中,例如 TCPTM、ECR 和 Lam Res 提供的系统。

2.3 反射率测温

通过反射率来实现测温,是利用温度与反射率的关系,首先测量出被测物体的反射率光谱,再将得到的光谱与标准的光谱对比就可以得到被测物体的温度值。需要注意的是,所测得的光学特性不仅依赖于晶圆片的温度,同时也包含了衬底生长速度、成分信息,两者相互影响,如何实现晶圆温度的精确和独立测量是较为关键的问题。2002 年柏林工业大学的 Haberland 等^[63]提出了在不同的金属-有机气象外延 (metal organic vapor phase epitaxy, MOVPE) 反应器中采用原位反射率各向异性光谱^[64]和光谱反射率测量相结合的方法,在 GaAs、AlAs 和 AlxGa1-xAs 生长过程中,对旋转和非旋转样品的热电偶读数进行了准确校准,并实现了±5 k 的绝对精度。2011 年由 Yamada 等^[65]提出的一种热反射温度测量系统,旨在实现等离子体刻蚀期间硅晶片表面温度测量的同时,尽量消除环境噪声的影响。

其原理如图 11 所示,通过引入两个正交偏振的差分热反射率,克服了诸如灵敏度低以及用于原位测量的安装空间和位置限制的困难,消除了由于入射光束强度波动或光路损耗变化带来的噪声^[65]。这种方法不能应用于光阻涂层表面,原因是在实验中出现的不可复制的信号变化。出现这种现象可能与光刻胶光学特性的变化有关,光刻胶层内的多次反射增强了光刻胶光学特性,因此该方法可应用于无光刻胶涂层的晶圆片刻蚀工艺。

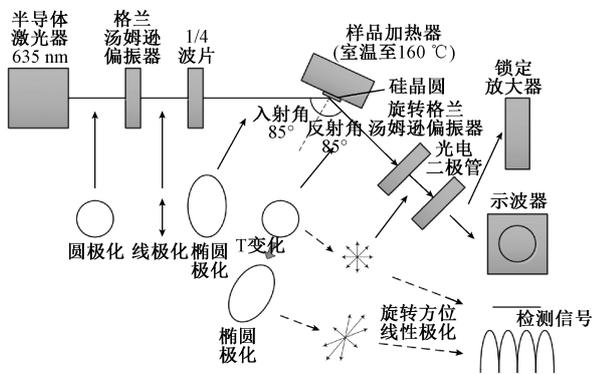


图 11 偏振差热反射率测量装置的建立

Fig. 11 The establishment of a polarization differential thermal reflectance measurement device

2.4 椭圆偏振法

利用椭圆偏振法实现对晶圆温度的测量本质上是用椭圆偏仪测量晶圆的折射率,由于折射率与温度有一定的关系,通过这种关系就能够反推晶圆的温度。这种方法相较于反射率测温,在精度方面有了巨大的提升。早在 1990 年 IBM 的 Kroesen 等^[66]就利用原位氦氛激光椭圆偏振测量法对晶圆的温度实现了测量并校准了这种方

法,确定了温度系数。1993 年由 Sampson 等^[67]也提出了使用椭圆偏仪在快速热处理环境中实现原位的硅晶片温度测量,如图 12 所示。在椭圆偏仪的基础上他们还开发了一种算法,该算法能够确定这种技术的分辨率极限。在 0°C ~ 1 100°C 的温度范围内,对于工作在 6 328 Å 波长的椭圆偏振仪,在测量参数 ψ 和 Δ 以及入射角 φ 中分辨率为 0.01°,可以预期最坏温度误差为±10°C。对于工作在 4 133 Å 的椭圆偏仪,从 0°C ~ 700°C 的温度范围,其最大误差提高到±1.4°C。

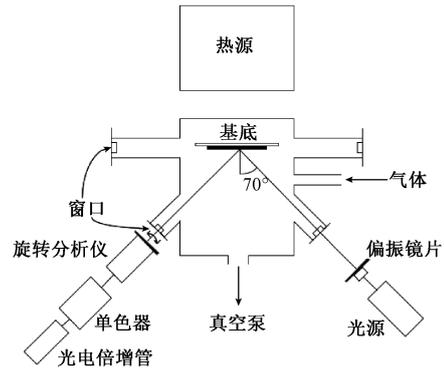


图 12 一种快速热加工室的原理图截面

Fig. 12 Principle diagram section of a rapid thermal processing chamber

2.5 激光干涉

激光干涉测温法是利用同一束激光在不同的反射面上会反射出两条同光源的两束光,这两束光由于是同光源,在另一表面相遇时会产生干涉条纹。在不同温度时,晶圆的厚度会发生改变,由于不同的光程差会导致干涉条纹的移动,根据这种移动,可以实现对温度的实时测量。1992 年来自德州仪器的 Loewenstein 等^[68]利用简单的干涉结构实现了对晶圆温度的测量,如图 13 所示。

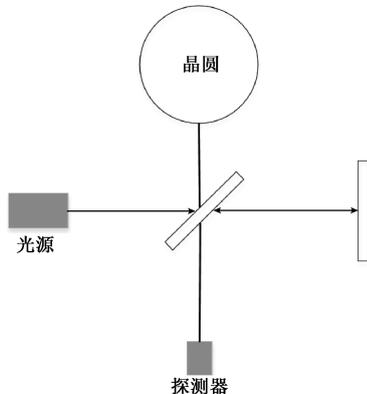


图 13 利用激光干涉实现晶圆温度测量

Fig. 13 Wafer temperature measurement using laser interference

该结构与用于观测干涉现象的结构基本一致。这种方法避免了器件污染的问题,同时理论上能够在任何温度下使用,但是它也存在许多的缺点,包括晶圆片的位置必须精确固定,干涉效果可能不够明显,人眼观测效果不够好,需要有计算机的支持,外界环境的干扰难以滤除,测量精度不高等。因而在此基础上诞生了一些改进的测量方法,例如红外激光干涉(infrared laser interference, IRLIT)测温和低相干干涉(low-coherence interferometry, LCI)测温方法。

红外激光干涉测温是一种非接触测温技术,适用于测量单个半导体衬底(正面和背部都经过抛光)的温度,该技术从热诱导的晶圆厚度和折射率的变化中测量温度。具体而言,该方法反应温度的变化是通过计算反射信号中的振荡(条纹)来测量的,对于厚度为1 mm的衬底,一个条纹通常对应 $3^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ 的温度变化。IRLIT非常适合接近室温^[69]和高于室温的测量。过去IRLIT已应用于Si、GaAs和InP衬底,其红外激光器的波长分别为 $1.1^{\mu\text{m}}$ ^[70]、 $1.5^{\mu\text{m}}$ ^[71-72]、 $2.4^{\mu\text{m}}$ ^[69]和 $3.39^{\mu\text{m}}$ ^[71]。IRLIT测量可达到的最高的温度主要受限于材料在探针波长 λ 处保存透明的要求。通常,带隙吸收将未掺杂或轻掺杂的Si(样品厚度为 $600^{\mu\text{m}}$)的测量值限制为在波长 $\lambda = 1.15^{\mu\text{m}}$ 时,测量最高温度为 350°C 。对于 $\lambda = 1.5 \sim 2.4^{\mu\text{m}}$ 时,最高温度为 900°C ^[69]。目前适用于IRLIT的单晶片工艺的实例包括分子束外延,反应离子刻蚀和快速热处理。

由于需要一个干净的反射信号,IRLIT似乎只能在“单晶圆”模式下使用,即激光探针一次只入射到一个晶圆上的配置模式。然而,现在的半导体工业的许多基础工艺是以“批处理”的模式进行的。例如,多晶硅的沉积通常通过CVD在管式炉中一次对12~25个左右的晶片批次处理。这些硅片被同轴地排列在石英舟上,典型的硅片与硅片之间的间距为几毫米。将IRLIT直接应用到这样的批量工艺中,会产生一个复杂的反射信号,因为每个晶圆的反射强度是其自身时间变化的反射率和光路中其他晶圆的变化的传输效率的产物。为了实现该测量技术从单个测量目标到多个的扩展,在1995年IBM的Saenger等^[73]利用涂层技术实现了在加热或冷却过程中测量满载腔室中选定位置晶圆的温度。

低相干干涉可以分为时域低相干干涉(time-domain low-coherence interferometer, TD-LCI)^[74-76]和频域低相干干涉(frequency-domain low-coherence interferometer, FD-LCI)^[77]两种。时域低相干干涉装置主要由迈克尔逊干涉仪和光电检测部分构成,其结构和图13相类似,只是光源被换成低相干光源,中间的半透半反镜被换为光纤耦合器。在实际测量时,低相干光源发出的光经过光纤耦合器分光后,一路作为参考光进入参考臂,另

一路作为探测光进入探测臂。参考臂平面反射镜需要来回移动,以获得一个较大的检测范围,但这就限制了数据采集速度,来回扫描过程中的振动噪声也会影响光学稳定性,从而导致温度测量精度降低。作为时域的改进,频域低相干干涉将参考臂平面反射镜固定,提高了系统的灵敏度。然而常规的FD-LCI在精确测量基板的光路长度时,需要补偿参考光和样本光之间的色散和偏振差异^[78-79],因此在该基础上,Tsutsumi等^[80]开发了使用公共路径干涉仪的自相关型频域低相干干涉仪(ACT-FD-LCI)系统,该系统移除了参考臂平面反射镜,其精度达到了 0.04°C ,反应时间为1 ms,如图14所示。

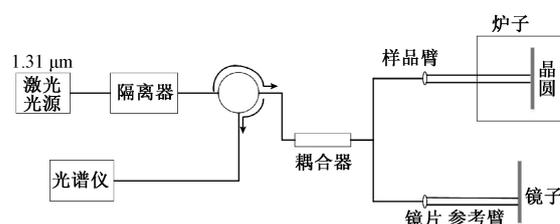


图14 自相关型频域低相干干涉仪

Fig. 14 Autocorrelation type frequency domain low-coherence interferometer

2.6 声学法

声学法测温的原理是声波在不同温度介质上具有不同的传播速度,通过这种关系建立声速与温度的关系,进而测量声速以解算出温度。在气体中,声音的速度是温度的单值函数,因此近年来发展的较为成熟的声波测温系统多应用于气体测温中^[81]。随着该技术的发展,在单个发射器和接受器的基础上发展了由多个发、接收器组成的阵列,利用CT声断层层析法可以实现对气体温度的二维甚至三维温度成像。应用于固体上时主要是利用声表面波进行测温,因为传统声波在固体中的传播是及其复杂的,固体中的声波会有切向与纵向的分量,而声表面波是一种频率很高的,只在固体表面传播的声波。目前对声表面波测温的研究主要集中在声表面波传感器(SAW)的研究上,利用压电材料和叉指换能器就能够构造出这种传感器的发射端和接收端^[82-85]。

在晶圆上使用时可以直接利用支撑晶圆的支撑鞘来实现声表面波的激发^[86-87]。1993年由Levent等^[88]提出的一种利用声表面波测量晶圆温度的结构,如图15所示,其中包括多个声波传感器连接到石英支鞘上,通过石英支鞘将延伸波耦合到晶圆片上产生Lamb波(一种声表面波),传感器由蒸汽冷却,同时石英支撑鞘上还有一个导轨。

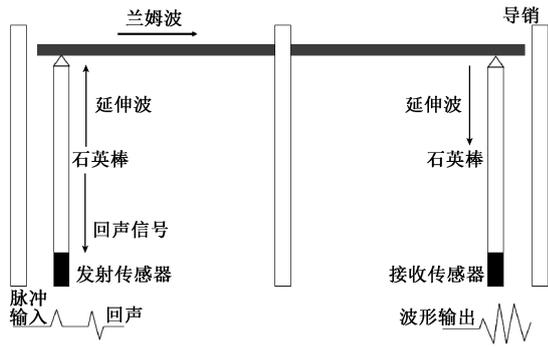


图 15 声学温度传感器(ATS)设备
Fig. 15 Acoustic temperature sensor (ATS) equipment

他们通过这种声表面波产生结构共设置了 8 个换能器,以 2 cm×2 cm 像素分辨率获得 10 cm(100)硅晶圆的热图像。并通过声学断层技术获得了快速热处理期间半导体晶片中的温度分布,测量精度为±2℃(在 S/N 比为 55 dB 下)。此后关于 Lamb 波应用于晶圆上的研究中大多都是基于这种结构。

2.7 红外成像测温

红外成像是一个国家军事力量的一个重要的技术指标。其测温原理和辐射测温的原理基本相同,即在自然界中,任何物体的温度如果超过绝对零度都会不断地向周围空间发出红外辐射能量,通过对物体自身辐射的红外能量的测量,便能准确地测定它的表面温度。红外成像测温是一种利用红外探测器将看不见的红外辐射转换成可见图像的被动成像仪器,相对于辐射测温关心点的温度,红外成像更加注重于热图像的重建。1991 年 Patel

等^[89]使用 IR CCD 相机实现了对晶圆温度的测量以及对等离子体腐蚀过程中的端点检测的热成像,装置如图 16 所示。

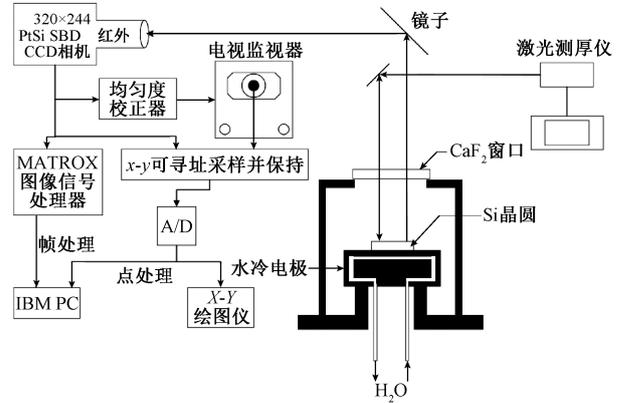


图 16 红外 CCD 原位监测系统
Fig. 16 In-situ infrared CCD monitoring system

2.8 小 结

非接触式的测温方法大多是通过光学来实现的,其优势是无需与晶圆进行直接的接触,给测量环境引入的破坏小,反应速度快等,缺点是测量精度有限,外界干扰多,实现温度场的测量较为困难等。目前非接触式在一些温度要求较高,温度变化快的场合中应用较多,比如 RTP。在这些场合中,它能够快速为系统提供温度反馈信号,实现工艺过程中的实时检测。非接触式和接触式的优缺点对比如表 1 所示。

表 1 接触式和接触式测温总结

Table 1 Summary of contact and contact temperature measurement

类别	原理	指标	优缺点
反应电阻	反应生成物薄膜电阻与温度具有依赖性	测温范围:0℃~1 200℃ 薄膜厚度:10 Å(Ti)	优点:测量温度范围大,可测较高的温度 缺点:重复利用率低、前期准备较为复杂、测量过程不确定性大、对基板伤害高、不能实时测温
接触式		测温范围: K 型(0℃~600℃)、T 型(0℃~200℃)、R 型(0℃~1 100℃) 精度:K 型(±1.1℃)、T 型(±0.5℃)、R 型(±1.5℃)	优点:理论成熟、装置简单、温度范围大、理论精度高、可测较高的温度 缺点:对晶圆造成一定的损伤、温度场受到破坏、不能实时测温、响应速度慢
晶体管	发射结电压与温度的依赖性	测温范围:<150℃ 精度:±0.75℃	优点:与硅晶圆工艺兼容、精度高、响应速度快 缺点:与热电偶一致

表1(续)

类别	原理	指标	优缺点	
辐射测温	普朗克黑体辐射定律	测温范围:200℃~1300℃ 精度:±1.5℃	优点:测量温度高、引入污染少、可实时在线监测温度数据、响应速度快 缺点:易受环境影响、测量精度有限、难以实现对面的测量、不适合低温度(<200℃)	
红外透射	透过材料的IR光的波长与温度具有依赖性	测温范围:0℃~100℃ 精度:±0.5℃	优点:精度高 缺点:装置安装难度大、环境引入的噪声较难解决	
非接触式	反射率	物体的反射率光谱随温度变化	测温范围:<500℃ 精度:±1℃	优点:精度高、可实时测量 缺点:测量结果存在晶圆表面生长物的干扰、存在环境的干扰
	原位椭圆偏振	温度影响物体的折射率	测温范围:0℃~700℃ 精度:±1.4℃	优点:可实时测量 缺点:环境影响较大
	低相干干涉	温度改变厚度进而改变光程差	测温范围:0℃~1000℃ 精度:±0.04℃	优点:精度高、灵敏度高 缺点:高精度测量需要的设备较为昂贵、环境影响较大
	声学法	温度影响声波传播速度	精度:±2℃	优点:设备较为简单、可以实现晶圆的温度场重建 缺点:精度受重建算法影响、激发工具与工艺设备不兼容

3 结 论

晶圆温度是半导体制造行业中非常重要的参数,对其采取精确的控制的前提是对它进行更加准确的监测和快速反馈,但是由于国内半导体行业发展较晚,导致国内基本没有成熟且商业化的监测晶圆温度的产品。大多的检测温度的产品都只是依靠简单的热电偶传感器阵列实现简单的温度检测,功能和性能与国外大厂存在较大差距。目前半导体制造设备被美国的KLA-Tencor、Applied Material和日本的HITACHI等行业巨头垄断。它们具有完整的产品系列,晶圆温度的监控装置多集成在刻蚀设备、气相沉积设备、快速热处理设备、薄膜生长设备中。

本文从接触式和非接触式两个大类介绍了目前用于晶圆的测温方式,参考表1可以看出无论是接触式还是非接触式都存在问题,接触式最大的问题是为处理环境中引入了污染物,破坏了温度场,不能够实时地测量晶圆温度。非接触式的最大问题是需要解决面温度的实时构建,尽可能的削减环境带来的影响。就目前市场上的产品来看,热电偶和高温计是应用最为广泛的方式。热电偶主要应用在晶圆温度均匀性要求较高的场合,例如PEB、刻蚀、薄膜生长等。高温计主要应用于温度变化快、上限温度高的场合例如RTP。

基于普通热电偶式测温的改进型,KLA系列嵌入

式产品占据了高端集成电路制造过程中工艺监控的大半市场,每年销售额近60亿美元。这种方法将热电偶或者其他温度传感器嵌入到晶圆内部中,虽然一定程度上能够解决外部引线带来的污染和温度场破坏的问题,但是也牺牲了可测温度的上限,不能够应用于温度较高的工艺环境中,比如RTP,同时其寿命较短,增加了制造成本。

结合目前存在的技术问题,本文认为未来集成电路制造过程中晶圆温度监测技术将会有以下几个发展方向:

- 1) 通过外部引线传输数据的方式将逐步被嵌入式晶圆取代。
- 2) 嵌入式晶圆将会朝着通用性发展,例如可拆卸的温度传感器、可编程的采集电路等。这种测试晶圆能够适应各种工艺环境的温度监测,从而降低成本。
- 3) 发展耐高温电路和绝热技术,提高嵌入式晶圆的测量温度。
- 4) 非接触式光学测温将会面向温度场重构的方向发展,其中可采用的技术包括在测温头加装摆扫镜、移动测温头实现扫描、多光束扫描等。
- 5) 非接触式最终可能会取代接触式。

参考文献

- [1] 彭砚森. 摩尔定律尽头的计算科学[J]. 科技创新与品牌, 2017(9): 40-41.
- PENG Y M. Computational science at the end of Moore's

- law [J]. Technological Innovation and Branding, 2017 (9): 40-41.
- [2] MACK C A. Fifty years of Moore's law [J]. IEEE Transactions on semiconductor manufacturing, 2011, 24(2): 202-207.
- [3] WILLIAMS R S. What's next? [the end of Moore's law][J]. Computing in Science & Engineering, 2017, 19(2): 7-13.
- [4] TUMMALA R R. Moore's law for packaging to replace Moore's law for ICS [C]. 2019 Pan Pacific Microelectronics Symposium (Pan Pacific), IEEE, 2019: 1-6.
- [5] 周雅萍. 半导体加工工艺和半导体制程设备[J]. 世界电子元器件, 1996(7):25-26.
ZHOU Y P. Semiconductor processing technology and semiconductor process equipment[J]. World Electronic Components, 1996(7):25-26.
- [6] SNEH O, CLARK-PHELPS R B, LONDERGAN A R, et al. Thin film atomic layer deposition equipment for semiconductor processing[J]. Thin Solid Films, 2002, 402(1-2): 248-261.
- [7] HATCH N W, MOWERY D C. Process innovation and learning by doing in semiconductor manufacturing[J]. Management Science, 1998, 44: 1461-1477.
- [8] QUIRK M, SERDA J. Semiconductor manufacturing technology[M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001.
- [9] SINGER P. Tantalum, copper and damascene: The future of interconnects[J]. Semiconductor International, 1998, 21(6): 90-98.
- [10] HIKAVYY A, KRUV A, VAN OPSTAL T, et al. Investigation of Cl₂ etch in view of extremely low temperature selective epitaxial processes [J]. Semiconductor Science and Technology, 2017, 32(11): 114006.
- [11] RAHAMAN S Z, WANG I J, CHEN T Y, et al. Pulse-width 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.
- [12] 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.
- [13] BELMONTE T, LEFÈVRE L, CZERWIEC T, et al. Measurements of the loss probability of nitrogen atoms versus temperature on various surfaces[J]. Thin Solid Films, 1999, 341(1-2): 27-30.
- [14] WAKABAYASHI T, NIITANI M, MEGURO K. Heat treatment method for semiconductor wafer: USApplication 16/072,541[P]. 2019-1-31.
- [15] PEJOVIĆ M M, RISTIĆ G S, MILOSAVLJEVIĆ Ć 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): 2536.
- [16] 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): 016202.
- [17] XIAO T F, LI X D, WANG SH Q. Dominant-modes-based sliding-mode observer for estimation of temperature distribution in rapid thermal processing system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 15(5): 2673-2681.
- [18] ZHANG X X, LI H X, WANG B, et al. A hierarchical intelligent methodology for spatiotemporal control of wafer temperature in rapid thermal processing [J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2016, 30(1): 52-59.
- [19] ADAMS B E. The challenges of temperature measurement in the semiconductor industry[C]. Proc of TEMPMEKO'99, The 7th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Science and Industry, 1999, 1: 3-10.
- [20] ROOZEBOOM F, PAREKH N. Rapid thermal processing systems: A review with emphasis on temperature control[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics Processing and Phenomena, 1990, 8(6): 1249-1259.
- [21] HUANG P, YANG H. A design method to improve temperature uniformity on wafer for rapid thermal processing [J]. Electronics, 2018, 7(10): 213.
- [22] LIU S L, SZU-LIN L I U, HORNG J J, et al. Integrated circuit designs based on temperature distribution determination: US10,289,777[P]. 2019-5-14.
- [23] TSAI B K. A summary of lightpipe radiation thermometry

- research at NIST[J]. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 2006, 111(1): 9.
- [24] SCHREUTELKAMP R J, VANDENABEELE P, DEWEERDT B, et al. In situ emissivity measurements to probe the phase transformations during rapid thermal processing Co silicidation[J]. *Applied Physics Letters*, 1992, 61(19): 2296-2298.
- [25] TSAI B K, BODYCOMB J, DEWITT D P, et al. Emissivity compensated pyrometry for specular silicon surfaces on the NIST RTP test bed [C]. *12th IEEE International Conference on Advanced Thermal Processing of Semiconductors*, 2004: 167-172.
- [26] HOEFFLINGER B. ITRS: The international technology roadmap for semiconductors [M]. *Chips 2020 Berlin: Springer*, 2011: 161-174.
- [27] 王莉莉, 王辉, 孙宽, 等. 生长温度对 MOCVD 外延生长 InGaN 的影响[J]. *半导体学报*, 2007, 28(z1): 257-259.
- WANG L L, WANG H, SUN X, et al. The influence of growth temperature on MOCVD epitaxial growth of InGaN[J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2007, 28(z1): 257-259.
- [28] ADAMS B. Temperature measurement in RTP: Past and future[C]. *2008 16th IEEE International Conference on Advanced Thermal Processing of Semiconductors*, 2008: 117-125.
- [29] 王爱华, 牛义红, 刘宇, 等. 掺杂硅硅栅晶圆片快速热处理工艺中的温度分布[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2014, 46(3): 124-128.
- WANG AI H, NIU Y H, LIU Y, et al. Temperature distribution during rapid thermal processing of doped silicon silicon gate wafer[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2014, 46(3): 124-128.
- [30] TAN W W, TANG J C, LOH A P, et al. In situ measurement of wafer temperature using two sensors with different dynamical properties[J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17(11): 2957.
- [31] SCHIETINGER C. Wafer temperature measurement in RTP[M]. *Advances in Rapid Thermal and Integrated Processing*, Dordrecht: Springer, 1996: 103-123.
- [32] SU A J, JENG J C, HUANG H P, et al. Control relevant issues in semiconductor manufacturing: Overview with some new results[J]. *Control Engineering Practice*, 2007, 15(10): 1268-1279.
- [33] LOHOKARE S. Accurate temperature measurement for semiconductor applications: US7, 380, 982 [P]. 2008-6-3.
- [34] VAN GRAVEN A M, WOLTERS R A M. Wafer temperature measurement in PVD systems using the Co-Si reaction [J]. *Microelectronic Engineering*, 2000, 50(1-4): 495-499.
- [35] ROWLAND D V, HUERTAS R A, PATEL N N. Monitoring wafer temperature during thermal processing of wafers by measuring sheet resistance of a test wafer: US6,033,922[P]. 2000-3-7.
- [36] 刘洋, 吴双, 赵永刚. 热电偶温度传感器的研究与发展现状[J]. *中国仪器仪表*, 2003 (11): 1-3.
- LIU Y, WU SH, ZHAO Y G. Research and development status of thermocouple temperature sensor [J]. *China Instrumentation*, 2003 (11): 1-3.
- [37] 郝丽宏, 林凌. 热电偶测温的若干问题[J]. *电子产品世界*, 2003 (1A): 83-85.
- HAO L H, LIN L. Some problems of thermocouple temperature measurement [J]. *Electronics World*, 2003 (1A): 83-85.
- [38] KREIDER K G, GILLEN G. High temperature materials for thin-film thermocouples on silicon wafers [J]. *Thin Solid Films*, 2000, 376(1-2): 32-37.
- [39] KREIDER K G, DIMEO F. Platinum/palladium thin-film thermocouples for temperature measurements on silicon wafers [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1998, 69(1): 46-52.
- [40] HOYT J L, WILLIAMS K E, GIBBONS J F. Method of welding thermocouples to silicon wafers for temperature monitoring in rapid thermal processing: US4, 787, 551[P]. 1988-11-29.
- [41] KREIDER K G, RIPPLE D C, DEWITT D P. Calibration of thin-film thermocouples on silicon wafers [C]. *Proc Tempmeko*, 1999, 99: 286-291.
- [42] CARDOSO A, SRIVASTAVA A K. Improvements in wafer temperature measurements [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 2001, 19(2): 397-402.
- [43] HUSSLA I, ENKE K, GRUNWALD H, et al. In situ silicon-wafer temperature measurements during RF argon-ion plasma etching via fluoroptic thermometry [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1987, 20(7):

- 889.
- [44] RENKEN W G, SUN M H, MILLER P, et al. Integrated wafer temperature sensors: US6, 325, 536 [P]. 2001-12-4.
- [45] CHUANG M C, HUANG J C. Wafer temperature sensing methods and related semiconductor wafer: US9, 562, 943 [P]. 2017-2-7.
- [46] ENGELMANN J, CHU D, DUPRAZ T, et al. Measuring the wafer temperature in CVD tools using the wireless SensArray HighTemp-400 wafer [C]. 2017 28th Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC), 2017: 161-164.
- [47] FANG F, PORTER C, REN ZH, et al. Correlation study of actual temperature profile and in-line metrology measurements for within-wafer uniformity improvement and wafer edge yield enhancement [C]. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXXII, International Society for Optics and Photonics, 2018: 105851Q.
- [48] TSENG S E, CHEN M L. Yield enhancement in stripper process and related process using SensArray HighTemp wafer [C]. 2016 27th Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC), 2016: 274-277.
- [49] 李云红. 基于红外热像仪的温度测量技术及其应用研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
LI Y H. Temperature measurement technology based on infrared thermal imaging camera and its application research [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [50] 李军, 刘梅冬, 曾亦可, 等. 非接触式红外测温的研究 [J]. 压电与声光, 2001, 23(3): 202-205.
LI J, LIU M D, ZENG Y K, et al. Research on non-contact infrared temperature measurement [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2001, 23(3): 202-205.
- [51] DE BOER W. System and method for suppression of wafer temperature drift in cold-wall CVD systems: US7, 921,802 [P]. 2011-4-12.
- [52] MADDING R P. Emissivity measurement and temperature correction accuracy considerations [C]. Thermosense XXI, International Society for Optics and Photonics, 1999, 3700: 393-401.
- [53] SATŌ T. Spectral emissivity of silicon [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1967, 6(3): 339.
- [54] VANDENABEELE P, MAEX K. Emissivity of silicon wafers during rapid thermal processing [C]. Rapid Thermal and Related Processing Techniques, International Society for Optics and Photonics, 1991, 1393: 316-336.
- [55] TIMANS P J. Emissivity of silicon at elevated temperatures [J]. Journal of Applied Physics, 1993, 74(10): 6353-6364.
- [56] LEE B J, ZHANG Z M, EARLY E A, et al. Modeling radiative properties of silicon with coatings and comparison with reflectance measurements [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2005, 19 (4): 558-565.
- [57] ADAMS B E, SCHIETINGER C W, KREIDER K G. Chapter 3 radiation thermometry in the semiconductor industry [J]. Experimental Methods in the Physical Ences, 2010, 43:137-216.
- [58] XU H, STURM J C. Emissivity of rough silicon surfaces: Measurement and calculations [J]. MRS Online Proceedings Library Archive, 1995, 387:29.
- [59] IUUCHI T, SEO T. Radiation thermometry of silicon wafers based on emissivity-invariant condition [J]. Applied Optics, 2011, 50(3): 323-328.
- [60] ZHANG Z M, LEE B J. Theory of thermal radiation and radiative properties [J]. Experimental Methods in the Physical Sciences, 2009, 42: 73-132.
- [61] SCHIETINGER C, ADAMS B, YARLING C. Ripple technique, a novel non-contact wafer emissivity and temperature method for RTP [J]. MRS Online Proceedings Library Archive, 1991, 224, DOI: 10.1557/PROC-224-23.
- [62] NI T Q, BARNES M. Rapid IR transmission thermometry for wafer temperature sensing: US6, 062, 729 [P]. 2000-05-16.
- [63] HABERLAND K, KALUZA A, ZORN M, et al. Real-time calibration of wafer temperature, growth rate and composition by optical in-situ techniques during Al_xGa_{1-x}As growth in MOVPE [J]. Journal of Crystal Growth, 2002, 240(1-2): 87-97.
- [64] STEIMETZ E, ZETTLER J T, SCHIENLE F, et al. In situ monitoring of InAs-on-GaAs quantum dot formation in MOVPE by reflectance-anisotropy-spectroscopy and ellipsometry [J]. Applied Surface Science, 1996, 107: 203-211.

- [65] YAMADA Y, ISHII J, NAKAOKA A, et al. Silicon wafer surface-temperature monitoring system for plasma etching process [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2011, 32(7-8): 1457-1466.
- [66] KROESEN G M W, OEHRLEIN G S, BESTWICK T D. Nonintrusive wafer temperature measurement using in situ ellipsometry[J]. *Journal of Applied Physics*, 1991, 69(5): 3390-3392.
- [67] SAMPSON R K, MASSOUD H Z. Resolution of silicon wafer temperature measurement by in situ ellipsometry in a rapid thermal processor [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1993, 140(9): 2673.
- [68] LOEWENSTEIN L M, LAWRENCE J D, FISHER W G, et al. Semiconductor wafer temperature measurement system and method: US5,102,231[P]. 1992-4-7.
- [69] MCCAULLEY J A, DONNELLY V M, VERNON M, et al. Temperature dependence of the near-infrared refractive index of silicon, gallium arsenide, and indium phosphide[J]. *Physical Review B*, 1994, 49(11): 7408.
- [70] DONNELLY V M, MCCAULLEY J A. Infrared-laser interferometric thermometry: A nonintrusive technique for measuring semiconductor wafer temperatures[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 1990, 8(1): 84-92.
- [71] SANKUR H, GUNNING W. Noncontact, highly sensitive, optical substrate temperature measurement technique[J]. *Applied Physics Letters*, 1990, 56(26): 2651-2653.
- [72] SAENGER K L, TONG F, LOGAN J S, et al. Wavelength-modulated interferometric thermometry for improved substrate temperature measurement[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1992, 63(8): 3862-3868.
- [73] SAENGER K L. Infrared laser interferometric thermometry: Extension to batch processing environments[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1995, 66(7): 3948-3950.
- [74] TAKEDA K, TOMEKAWA Y, SHIINA T, et al. Temperature-measurement system using optical fiber-type low-coherence interferometry for multilayered substrate[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004, 43(11R): 7737.
- [75] OHTA T, KOSHIMIZU C, KAWASAKI K, et al. Simultaneous measurement of substrate temperature and thin-film thickness on SiO₂/Si wafer using optical-fiber-type low-coherence interferometry[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105(1): 013110.
- [76] KOSHIMIZU C, OHTA T, MATSUDO T, et al. Low-coherence interferometry-based non-contact temperature monitoring of a silicon wafer and chamber parts during plasma etching [J]. *Applied Physics Express*, 2010, 3(5): 056201.
- [77] TSUTSUMI T, OHTA T, ISHIKAWA K, et al. Rapid measurement of substrate temperatures by frequency-domain low-coherence interferometry [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(18): 182102.
- [78] VAKHTIN A B, KANE D J, WOOD W R, et al. Common-path interferometer for frequency-domain optical coherence tomography [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(34): 6953-6958.
- [79] TUMLINSON A R, BARTON J K, POVAŽAY B, et al. Endoscope-tip interferometer for ultrahigh [J]. *Optics Express*, 2006, 14(5): 1878-1887.
- [80] TSUTSUMI T, OHTA T, ISHIKAWA K, et al. Robust characteristics of semiconductor-substrate temperature measurement by autocorrelation-type frequency-domain low-coherence interferometry [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2014, 54(1S): 01AB03.
- [81] 刘学青, 译. 新式温度传感器[J]. *现代材料动态*, 2012(5):4-4.
LIU X Q, trans. New temperature sensor[J]. *Modern Materials Trends*, 2012(5):4-4.
- [82] LI CH, LIU X ZH, SHU L, et al. AlN-based surface acoustic wave resonators for temperature sensing applications [J]. *Materials Express*, 2015, 5(4): 367-370.
- [83] WANG CH Y, WANG C C, JIN D, et al. AuNP-amplified surface acoustic wave sensor for the quantification of exosomes [J]. *ACS Sensors*, 2020, 5(2): 362-369.
- [84] FURNISS J, CARKA D, VOICULESCU I, et al. Surface acoustic wave (SAW) sensors for cryogenic temperature and strain sensing [C]. 2018 6th IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE), 2018: 206-211.
- [85] VIESPE C, MIU D. Surface acoustic wave sensor with Pd/ZnO bilayer structure for room temperature hydrogen detection[J]. *Sensors*, 2017, 17(7): 1529.
- [86] LEE Y J, KHURI-YAKUB B T, SARASWAT K C.

Acoustic temperature and film thickness monitor and method: US5,469,742[P]. 1995-11-28.

- [87] LEE Y J, KHURI-YAKUB B T, SARASWAT K. Temperature measurement in rapid thermal processing using the acoustic temperature sensor [J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 1996, 9(1): 115-121.
- [88] LEVENT DEGERTEKIN F, PEI J, KHURI-YAKUB B T, et al. In situ acoustic temperature tomography of semiconductor wafers [J]. Applied Physics Letters, 1994, 64(11): 1338-1340.
- [89] PATEL V, PATEL M, AYYAGARI S, et al. Wafer temperature measurements and end-point detection during plasma etching by thermal imaging[J]. Applied Physics Letters, 1991, 59(11): 1299-1301.

作者简介



贾镜材,2018年于西华大学获得学士学位,现为电子科技大学硕士研究生,主要研究方向为大规模集成电路制造过程中的温度监测设备研发。

E-mail:18328074817@163.com

Jia Jingcai received his B. Sc. degree from Xihua University in 2018. Now, he is an M. Sc. candidate in University of Electronic Science and Technology of China. His main research direction is the research and development of temperature monitoring equipment in the manufacturing process of large-scale integrated circuits.



钟业奎,2018年于合肥工业大学获得学士学位,现为电子科技大学硕士研究生,主要研究方向为大规模集成电路制造过程中的在线监测装备研发和单片微波集成电路设计。

E-mail:zhongyekui@163.com

Zhong Yekui received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 2018. Now, he is an M. Sc. candidate in University of Electronic Science and Technology of China. His main research direction is the research and development of online monitoring equipment in the manufacturing process of large-scale integrated circuits. and the design of monolithic microwave integrated circuits.



姜晶,2007年于电子科技大学获得学士学位,2013年于电子科技大学获得博士学位,现为电子科技大学副研究员,主要研究方向为非接触式光学监测仪器制造以及半导体材料的生长与应用基础研究。

E-mail:jiangj@uestc.edu.cn

Jiang Jing received her B. Sc. degree in 2007 and Ph. D. degree in 2013 both from the University of Electronic Science and Technology of China. Now, she is an associate research fellow in University of Electronic Science and Technology of China. Her main research direction is the manufacture of non-contact optical monitoring instrument and basic research on the growth and application of semiconductor materials.



王超(通信作者),2003年于清华大学获得硕士学位,2008年于牛津大学获得博士学位,现为电子科技大学教授,主要研究方向为非接触式光学监测仪器制造以及半导体材料的生长与应用基础研究。

E-mail:cwang@uestc.edu.cn

Wang Chao (Corresponding author) received his M. Sc. degree from Tsinghua University in 2003 and Ph. D. degree from Oxford University, UK in 2008. Now, he is a professor in University of Electronic Science and Technology of China. His main research direction is the manufacture of non-contact optical monitoring instrument and basic research on the growth and application of semiconductor materials.