

DOI:10.19816/j.cnki.10-1594/tn.2022.01.075

半导体工业原材料分析检测技术现状与进展

许志贤,姚继军,胡建坤,夏晓峰,卢水淼,梅华灯,李伟东

(杭州谱育科技发展有限公司 杭州 310052)

摘要: 半导体是一种固体材料,其电导率随着温度在绝缘体和导体之间变化,包含基于硅或锗的经典半导体、砷化镓或磷化铟(III-V 半导体)第二代半导体及碳化硅、氮化镓化合物的新型半导体。半导体元件的特性可通过半导体材料的选择和有针对性的改性(掺杂、注入)进行优化,结合复杂的工艺方法(光刻、绝缘层沉积、蚀刻工艺),几乎可制造出大部分电子设备中使用的电子元件(二极管、晶体管)。半导体元件的性能和使用寿命主要取决于生产所用原材料的纯度以及制造中工艺流程的精细度。因此,生产原材料的纯度与组成成分分析检测是半导体工业的关键环节。本文结合近年来国内外半导体工业原材料中的化学元素分析检测的发展情况进行论述,旨在对半导体制造行业提供技术参考,同时,为国产分析检测仪器行业的发展规划思路提供借鉴。

关键词: 半导体工业;原材料;分析检测技术;化学元素分析

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510

Status and progress of raw material analysis and detection technology in semiconductor industry

XU Zhixian, YAO Jijun, HU Jiankun, XIA Xiaofeng, LU Shuimiao, MEI Huadeng, LI Weidong

(Hangzhou Puyu Technology Development Co., Ltd., Hangzhou 310052, China)

Abstract: Semiconductor is a solid material whose conductivity alters between insulator and conductor with temperature. It includes classical semiconductors based on silicon, germanium, gallium arsenide, indium phosphide (III-V semiconductors), and some new organic semiconductors. Its performance can be optimized by modification (doping, implantation), accompanied by micro-nano fabrication (lithography, insulating layer deposition, etching processes), and almost all electronic devices (diodes, transistors) can be manufactured. The performance and lifespan of semiconductors are mainly determined by the purity of the raw materials and the process accuracy. Therefore, the detection and analysis of raw materials are significant in the semiconductor industry. This study discusses the developments of element analysis technologies in the semiconductor industry in the past ten years, to provide technical references for the semiconductor industry, and to support the domestic analytical instrument industry.

Keywords: semiconductor industry; raw material; analysis and detection technology; chemical element analysis

0 引言

2018年以来,由于“中兴事件”、“华为事件”及“海康威视事件”的接连爆发,社会大众对“半导体”这一名词已不再陌生,“集成电路”、“芯片”等关键词频繁出现在公众视野。半导体工业既涉及物理、化学、材料等多学科知识,又涉及制备、刻蚀、封装等专业技术,是一个知识密集、技术密集、人才密集、资金密集型的综合型行业^[1]。整个半导体产业链条可划分为3个主要部分^[2],分别是由半导体原材料构成的上游部分;由光电子器件、分立器件、传感器、集成电路组成的中游部分;由终端电子产品组成了

半导体行业的下游部分。其中,半导体原材料是整个行业的根基。根据经济社会发展规律,基础不牢固的行业,发展必将无法长远。以半导体强国日本为例,虽然在20世纪中期曾在半导体领域里有过低潮,但凭借其在半导体原材料产业端的绝对优势,依然可以矗立于全球半导体行业的制高点^[3]。

半导体原材料是半导体行业必不可少的核心部分,只有原材料性能的不断提升,才能保障对应元器件的功能不断完善,以应对科技发展对元器件提出的越来越严苛要求。硅片晶圆纯度、生产过程中使用的清洗剂和刻蚀剂、封装材料、环境洁净度等都会影响产品良率。半导体原材料大致可分为制造材料

和封装材料两大类,如表 1 所示。原材料的纯度和组成成分决定其下游半导体元器件功能/性能和寿命,如半导体材料中含有的少量杂质会强烈地影响后续工艺器件的基本性能,影响半导体产品的可靠性,甚至造成产品失效,故将杂质元素称为污染物^[4]。因此,在接收原材料的供应链端、生产制造过程、故障检测阶段以及整个封装过程中,必须对各杂质含量进行严格控制,降低杂质污染,提高产品质量。

表 1 半导体原材料种类

Table 1 Types of semiconductor raw materials

原材料	细分种类
制造材料	晶圆、化学试剂、光刻辅助试剂、光刻掩膜、各种气体、CMP 抛光液体及抛光垫、光刻胶、溅射靶材
封装材料	框架、有机基板、陶瓷封装体、封装树脂、键和金属线、芯片粘接材料

在现代半导体材料制备工艺中,杂质的含量严格控制在 $10^{13} \text{ atoms} \cdot \text{cm}^{-3}$ 以下,以太阳能级硅材料为例,通常使用纯度为 6 个 9 以上的高纯硅材料,即纯度为 99.999 9% 以上的硅材料^[5]。由此可见,半导体原材料纯度及杂质分析属于痕量 (trace, < 0.01%) 分析,甚至超痕量 (ultratrace, < 0.000 1%) 分析。其分析检测方法主要根据被分析对象和测定方法的检出限、灵敏度、准确度、精密度及成本的合理性进行选择。目前,半导体原材料的痕量/超痕量分析方法涵盖从经典的比色法和分光光度法到各种近现代的精密仪器等精密分析方法^[6]。污染杂质包含化学元素杂质、化合物杂质、物理杂质 (晶体缺陷)、颗粒物等,本文主要针对化学元素杂质进行论述。

本文将结合半导体上游原材料端及芯片研制、生产过程中薄弱的检测环节^[7]和近年来主流的材料纯度分析及杂质检测技术进行阐述。在美、欧等西方国家对我国实行引进高端精密分析检测技术限制的现状下为半导体从业人员提供选择参考,同时,亦为国内精密科学仪器制造同行梳理面临的机遇与挑战。

1 痕量/超痕量组分检测分析技术

半导体工业在集成电路 (integrated circuits, IC) 的制造工艺中,通过沉积、掩模、刻蚀技术在高纯度晶圆衬底上构建导电层或绝缘层,形成通孔,导电/绝缘层由通孔连接形成计算和存储功能所需的 3D 结构,经过封装得到具有特定功能的半导体器件

(芯片)。目前,5 nm 制程工艺 (甚至 3 nm 制程工艺) 日趋成熟,已在部分通讯设备芯片等进行应用,相当于线宽小至 3 nm 或 5 nm (约 10~20 个硅原子)^[8]。国际半导体设备与材料产业协会^[9] (SEMI) 规定适用于 90~800 nm 之间的 3D 结构,需使用 B/C 级化学品,但是随着尺寸更小 3D 结构的产业发展趋势,升级至 D/E 级规格的化学品势在必行。SEMI 发布的半导体制程所使用化学试剂性能指标中规定高纯电子级硅的纯度必须满足在 9~11 N, 9 N 纯度相当于固体硅材料中全部杂质元素的最大浓度为十亿分之一。随着器件尺寸的减小和结构密度的增加需要更严格污染杂质控制手段,对更高纯度的晶圆及电子级湿化学品要求更加苛刻,进而对相关材料的污染杂质进行分析检测的科学分析仪器提出了更高的要求。以 E 级化学品纯度/杂质分析为例,其对分析检测仪器的检出限基本要求为 $<0.1 \times 10^{-9}$ 并能够准确加标回收 0.5×10^{-9} 的污染杂质。

半导体工业领域进行原材料的纯度及杂质分析的痕量/超痕量检测技术主要有两大类^[10],第一类是非质谱法,如原子吸收光谱法^[11] (FAAS 和 GF-AAS)、原子发射光谱法^[12] (ICP-OES)、中子活化分析法^[13] (NAA);第二类是质谱法,如电感耦合等离子体质谱法^[14] (ICP-MS)、辉光放电质谱法^[15] (GD-MS)、二次离子质谱法^[16] (SIMS) 等。20 世纪 70 年代初,AAS 已经开始应用 (尤其石墨炉原子吸收光谱,GF-AAS),随着光谱分析技术的发展成熟吸引了行业的关注,如电感耦合等立体发射光谱 (ICP-OES);进入 21 世纪后,电感耦合等离子体质谱技术 (ICP-MS) 成为行业青睐的方法;近十年来,串联质谱分析技术 (MS/MS) 日益被众多晶圆工厂及半导体器件生产商所采用;由于样品制备的简便,GD-MS 已经较为普遍地应用到了高纯金属材料、半导体等的痕量、超痕量分析中。

1.1 非质谱法

原子吸收光谱法和原子发射光谱法均属于原子光谱法,根据原子轨道的电子在基态和激发态跃迁方向不同进行区分^[11]。

当特定波长光源发出的辐射通过基态自由原子蒸汽,光源的特定频率为原子由基态跃迁到较高能态 (通常为第一激发态) 所需要能量频率时,原子就从辐射场中吸收能量,产生共振吸收,产生原子吸收光谱。根据朗伯比尔定律 (Beer-Lambert law),测量辐射光强度减弱的数值即可计算出样品中目标元素

的含量。按样品原子化方式的不同,原子吸收光谱可分为火焰原子吸收光谱(FAAS)、石墨炉原子吸收光谱(GF-AAS)。

ICP-OES 中的等离子体是一种原子或分子(通常选用氩气)大部分已产生电离的高温气体,温度高达 10 000 K,进入等离子体的试样气溶胶在高温作用下,经历蒸发、干燥、分解、原子化和电离的过程,产生的原子和离子被激发,并发射出各种特定波长的光,这些光经光学系统通过入射狭缝进入光谱仪照射在光栅上,光栅对光产生色散使之按波长分解成光谱线。选定的目标波长的光通过出射狭缝照射在光电倍增管上产生电信号,此信号输入电子计算机后与标准的电信号相比较,从而计算试样的浓度。

在 FAAS、GF-AAS、ICP-OES 等原子光谱分析中,大部分需对样品进行前处理,通过加入液体试剂,依靠一定的消解方式或仪器设备,完成对样品的分解和溶解,将目标物从样品转移至溶液中。针对标准曲线法的原子光谱分析,容易获取标准系列是液体试样的最主要优点,反之,液体试样获取复杂的前处理流程又是原子光谱分析的致命弱点,尤其原样为固体形态。激光诱导激发光谱(LIBS)、辉光放电原子发射光谱(GD-AES)等新型原子化技术解决了固体直接进样的难题,但是由于标准样品难以获取和影响因素复杂,行业生产领域的应用受限,当技术取得突破时,将展现其极大的价值。

1.2 质谱法

原子光谱在 20 世纪就被行业广泛应用在痕量元素分析,尤其 ICP-OES 多元素同时分析。然而,在使用的过程中发现,光谱方法分析时遇到高浓度的基体容易产生测不准的问题。因为光谱中普遍出

现基体元素的谱线,产生严重的光谱干扰。质谱法分析谱图简单、分辨率高、检测限低,满足复杂基体中痕量分析的要求。

质谱法是利用质谱仪表征物质质量的方法,其基本原理是将样品电离为带电离子,带电离子在电场或磁场的作用下可以在空间或时间上进行分离,这些带电离子被检测器检测到即可得到其荷质比与相对强度的质谱图,进而计算出目标物的原子/分子质量。通过质谱图或精确的分子质量测量可以对目标物做定性分析,利用检测到的离子强度可做准确的定量分析^[10]。

质谱仪的种类很多,但是基本结构类似,主要分成 5 个部分:样品导入系统、离子源、质量选择器、检测器及数据分析系统。样品进入质谱仪后,首先通过离子源对进样系统导入的样品进行电离,以电子、离子、分子或光子形式将样品转换为气相的带电离子,目标物依其性质成为带正电的阳离子或带负电的阴离子。气相离子进入质量选择器进行选定质荷比的测量。在电磁场等物理作用下,离子运动的轨迹受场力的影响而被特定导向,检测器则可将接收到特定质荷比的离子转换成电子信号,处理并储存于计算机中,再以各种方式转换成质谱图。根据离子化方法不同,可以分为 ICP-MS、GD-MS、SI-MS 等。此外,质谱仪也可以利用串联质谱(MS/MS)技术,一般由两个的质量选择器间串联一个碰撞池组成,双重质量选择仅允许选定质荷比的分析物目标离子和干扰离子进入碰撞池,更有效地去除干扰,具有更高的灵敏度和检出限。

表 2 列举了非质谱法与质谱法的优劣势,以 GF-AAS、ICP-OES 和 ICP-MS 为例。

表 2 GF-AAS、ICP-OES 和 ICP-MS 对比

Table 2 Comparison of GF-AAS, ICP-OES and ICP-MS

光谱分析方法	灵敏度	检测限	线性范围	测量元素	是否同时测量多种元素	运维要求	成本
GF-AAS	中等	$<1 \times 10^{-6}$	2 个数量级	约十几种	否	要求较低	中等
ICP-OES	中等	约 1×10^{-5}	6 个数量级	71 种	是	要求较低	中等
ICP-MS	高	$<1 \times 10^{-9}$	9 个数量级	86 种	是	要求较高	高

2 晶圆检测分析

高纯度晶圆衬底作为 IC 制程中的载体基片,单/多晶硅是最常见的晶圆,随着半导体科技的发展许多其他材料亦可作为晶圆材料,如碳化硅(SiC)、氮化硅(SiN)和砷化镓(GaAs)。硅晶圆纯度或杂质含量分析技术的一般方法是将晶圆溶于氢氟酸(HF)中,利用 GF-AAS、ICP-OES、ICP-MS 分析 HF

提取液中痕量元素的含量^[17],此时,需要选用耐氢氟酸的样品导入系统,以减少 HF 对仪器的损害及对分析结果的影响。GF-AAS 虽在某些杂质(Pb、Cd 等)含量分析检出限可以同 ICP-MS 相媲美,但是 GF-AAS 一次只能分析一种杂质含量且存在严重基体效应(基体改进剂的使用可以有一定程度的改善,也存在引入新的污染杂质风险),严重限制了其应用场景。提取试样的复杂基体环境,使得 ICP-

OES 具有较大的基体效应和光谱干扰,影响了分析的准确性和稳定性。第一台 ICP-MS 在 20 世纪 80 年代商品化后(铂金埃尔默,PerkinElmer),因其高灵敏度、低检测限和多元检测能力,半导体制造业便对其充满期待,随着“冷等离子体”的成功开发,ICP-MS 在半导体领域的应用在随后的十年间得到快速发展,逐步取代 GF-AAS 与 ICP-OES 对杂质含量的分析检测。半导体产业对更高级别化学品需求不断推动质谱分析技术的创新,2001 年 PerkinElmer 碰撞反应池技术,2012 年安捷伦(Agilent)串联四极杆质谱,比早期单的四极杆 ICP-MS 提供了更高的灵敏度、更低的背景和更出色的抗干扰物性能,至 2021 年底包含赛默飞世尔(ThermoFisher)、杭州谱育科技(聚光科技)在内的三重四极杆 ICP-MS 的相继推出,使得监测更低数量级的污染杂质成为可能。

将晶圆溶解于氢氟酸的破坏性提取方法能够准确分析晶圆中杂质的含量,但是作为半导体基底材料的晶圆主要由于在其表面的杂质成分影响下游器件的性能(即表面沾污)。

在晶圆表面的痕量金属杂质的分析中,其前处理过程是一难点,前处理过程所用的提取酸液越多,稀释倍数越大,则需要更高灵敏度和更低检测下限的高性能质谱分析仪器。因此,如何使用少量的提取酸液,且能有效完全地提取晶圆表面金属沾污杂质,还需避免提取过程中引入新的污染。为克服这一挑战,经过数十年的探索,形成 3 种硅片表面杂质元素提取用于 ICP-MS 分析的方法^[18-21],分别为气相蒸发提取法(vapor phase decomposition, VPD)、液滴提取法(liquid drop decomposition, LDD)、液滴层积刻蚀法(droplet sandwich etch, DSE)。VPD 是在 PFA 或 PTFE 材质的密闭容器中先用 HF 蒸汽溶解晶圆表面的自然氧化层或工艺热氧化层,同时溶解了存在于氧化层表面或内部的金属杂质,再用一滴(250 μL ~2 mL)HF/H₂O₂混合溶液在晶圆表面滚动收集溶解的金属杂质元素;LDD 减少使用 HF 蒸汽溶解的步骤,直接用一滴 HF/H₂O₂混合溶液溶解提取晶圆表面氧化层,与 VPD 相比,更简便,但是收集的试液中的 Si 等基体浓度将会比 VPD 法高一个数量级,对元素的检测下限会产生影响,尤其晶圆生产过程严格控制的碱土金属元素;DSE 使用 HF/HNO₃混酸,不仅溶解了晶圆表面氧化层外,还会对其表面有一浅层刻蚀,可以测定晶圆浅表面层的金属杂质,改变 HF 和 HNO₃比例得到不同的刻蚀深

度。通过 VPD、LDD、DSE 提取的晶圆表面污染金属元素试液,使用 ICP-MS 或 HR-ICP-MS 进行痕量分析,监控晶圆生产过程的表面金属污染情况。

与 LDD 和 DSE 相比,VPD 是经过验证的、在规模化生产上可行的晶圆表面金属杂质提取的有效方法,即 VPD-ICP-MS 是一种在业界广泛采用的测量晶圆表面金属杂质污染的技术,具有卓越的灵敏度。VPD 在行业应用初期是由人工执行,往往需要经验丰富的工程师才能从晶圆表层获得较为一致的溶解态杂质金属回收率。人工成本和测量需求的提高,促进了自动 VPD 系统的出现,如日本的 IAS 和 NAS GIKEN、韩国的 NvisANA、德国的 PVA TePla AG 均推出自动化 VPD 扫描仪,可与全球范围内主流厂商的 ICP-MS 或 ICP-MS/MS 进行连用。自动 VPD-ICP-MS 或 VPD-ICP-MS/MS 不仅拥有高灵敏度和低检测限,同时自动化过程可确保一致性和降低污染。

3 电子级湿化学品检测分析

电子级湿化学品又称超净高纯试剂或工艺化学品,是集成电路、超大规模集成电路和分立器件制作过程中的关键性基础化工材料之一。电子级湿化学品主要用于芯片的清洗、腐蚀及晶圆的清洗,它的纯度和洁净度直接影响芯片的 3D 结构的实现,对集成电路的成品率、电性能及可靠性都有着重要的影响,因此,对超净高纯试剂中含有的金属离子和硼、硅、砷、磷、硫、氯及有机碳等非金属离子有严格的要求。

随着 IC 技术向亚微米及纳米方向的发展,电子级湿化学品对金属及非金属杂质含量的要求高达 10⁻¹²数量级。常用的痕量元素的分析测试方法,如 GF-AAS、ICP-OES,已经无法满足行业应用需求,ICP-MS 及 ICP-MS/MS 已成为金属杂质分析测试的主要手段。非金属杂质(Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻、PO₄³⁻等)最常用的分析测试手段是离子色谱法。离子色谱法是根据离子交换原理,由于被测阴离子水、离子半径和所带电荷不同,在阴离子交换树脂上造成分配系数不同,使阴离子在分离柱上得到分离,然后经过抑制柱去除洗脱液的导电性,采用电导检测器、质谱检测器进行分析。

电子级湿化学品中的无机类试剂及使用离子色谱进行分析试剂,通常直接或一定倍数稀释后进入相应分析仪器进行分析测试。相比无机类试剂,有机类试剂分析测试更为复杂,ICP-MS 或 ICP-MS/

MS 本身对有机试剂耐受程度不高,无法承受过高的有机基体试样,或只能承受低含量的有机基体试样。因此,在进行 IPA 等有机试剂的金属杂质元素分析时,通常要先经过基体去除-重新溶解的前处理步骤^[22]。

如表 3 所示,电子级是化学品中杂质含量测量,常用标准曲线法进行定量分析是一种相对的分析方法,需要化学纯品做标准对照。分析试样与标准试样的基体环境不同,在精密分析仪器端会因为基体效应导致测量结果偏离真实值。基体效应,不仅在有机类试剂分析时存在,同时也存在无机类试剂分析过程中。标准加入法是一种复杂的基体试样准确分析的方法,不存在由于标准试样和分析试样基体组成不同而带来的干扰^[23]。

表 3 部分常用电子级化学品用途

Table 3 Application of common process-chemicals

种类	用途
过氧化氢 (H_2O_2)	晶圆清洗最常用的强氧化剂,与硫酸共同使用可去其上的光刻胶及其他有机污染物
硫酸 (H_2SO_4)	常用于集成电路制作过程中,结合 H_2O_2 或臭氧可在晶圆表面上的有机物污染
盐酸 (HCl)	2 号标准清洗液的组成部分,常用来去除晶圆中重金属元素
氢氟酸 (HF)	半导体制作过程中应用最多的超净高纯试剂之一,可去除部分氧化物
硝酸 (HNO_3)	用 HF 和 HNO_3 的混合液常用来刻蚀磷硅酸盐玻璃 (PSG)
磷酸 (H_3PO_4)	刻蚀氮化硅 (Si_3N_4) 晶圆
氢氧化钠 (NaOH)	主要用于湿法刻蚀
四甲基氢氧化铵 (TMAH)	正性光刻胶显影剂
异丙醇 (IPA)	通用的清洗剂
丙酮 (Acetone)	通用的清洗剂(比 IPA 更强)
去离子水 (DI Water)	半导体制造过程中最广泛使用的溶剂,主要用于晶圆的漂洗和其他清洗剂的稀释

晶圆工厂和 IC 制造工厂的晶圆清洗及制程工艺过程需要对电子级湿化学品的污染情况进行严格控制,实时掌握其污染杂质含量,避免给生产过程造成重大损失。为满足行业需求,美国的 ESI、日本的 IAS、中国台湾的金兆益等开发出湿化学品的在线实时分析系统及在线加标分析系统,在线取样、实时分析,实时监控湿化学品污染情况^[24]。2021 年,为了应对国外对我国半导体行业的“卡脖子”限制,杭州谱育科技相继开发出 FAAS 8000 湿化学品在线分析

系统^[25]和 SA 280 湿化学品在线加标分析系统,将满足国内半导体工业对湿化学品在线分析检测的需求。

4 气体分析检测分析

半导体制造过程中,共约 450 道工艺流程中大概使用 50 种不同种类的气体^[26],包含通用气体(氧气、氮气、氢气、氦气、氩气)和特种气体(硅烷、氯化氢、氨气、氯气等)。气体中的有害杂质会严重影响半导体器件的质量和成品率,故所用气体都要求具有极高的纯度,通用气体要控制在 7 个 9 以上纯度(99.999 99%),特种气体要控制在 4 个 9 以上纯度(99.99%)。

受气体样品属性决定,气相色谱(GC 或 GC-MS)是分析检测气体中痕量杂质的理想仪器,瓶装气体样品检测具有速度快,准确度高,重复性和稳定性良好,操作简便等优点,已被广泛的应用于气体分析领域中^[27]。将气体样品通过去离子水等其他溶剂进行吸收取得试液,再通过离子色谱、ICP-MS 或 ICP-MS/MS 进行分析测量得气体中的杂质含量^[28]。痕量水是半导体工业用气中一种特殊杂质,主要检测方法有气相色谱法、转化色谱法、电化学法、露点法、光腔衰荡法、红外吸收光谱法、大气压电离质谱法、卡尔·费休法等。

5 总结与展望

通过对近年来在半导体材料纯度的检测分析技术的总结,为国内半导体从业者提供可选择的技术支持,形成半导体工业成熟完整的产业体系,在技术水平上缩小与国际先进水平的差距,提升企业的实力。此外,机遇与挑战并存,国内精密科学仪器制造业应抓住技术升级和商业模式转变所带来的历史性发展契机,充分发挥后发优势,推动中国高端精密科学分析仪器产业实现跨越式发展。让半导体产业在实现中国工业化和信息化,带动其他产业转型升级方面发挥排头兵的作用,为中国在全球信息化的竞争中占据有利地位,实现由中国制造向中国创造转型提供保障。

未来,工业 4.0 的不断深入,半导体行业分析检测技术的自动化是大势所趋。从 20 世纪 70 年代,半导体产业的自动化就开始兴起,随着产业的成熟,检测技术日趋稳定,在市场和技术的推动下,半导体行业的分析测量技术必将向自动化、实时化迈进,使得整个半导体产业从单纯的工艺设备自动化向整个工厂自动化发展。

参考文献

- [1] 王鹏飞. 中国集成电路产业发展研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- WANG P F. Research on the development of integrated circuit industry on China[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014.
- [2] 张玉娇. 韩国半导体产业研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- ZHANG Y J. Research on the development of Korean semiconductor industry[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [3] 胡续楠. 中国新材料产业集约化发展研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- HU X N. Research on the intensive development of new material industry in China[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [4] 郭帝江, 常志. 晶圆缺陷的种类及处理方法研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2021, 11(6): 135-136.
- GUO D J, CHANG Z. Research on types and treatment methods of wafer defects[J]. Modern Industrial Economy and Informatization, 2021, 11(6): 135-136.
- [5] GUAN V S, SHUI J, CHANG K. The quality control application for abnormal raw material early detection[C]//2013 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. Bangkok: IEEE, 2013: 1179-1183.
- [6] MORRISON C, SUN H C, YAO Y W, et al. Methods for the ICP-OES analysis of semiconductor materials[J]. Chemistry of Materials, 2020, 32(5): 1760-1768.
- [7] 闫方亮. 共享实验室在半导体检测方面的进展[J]. 微纳电子与智能制造, 2019, 1(2): 83-88.
- YAN F L. Progress of shared laboratory in testing and measurement of semiconductor industry[J]. Micro/nano Electronics and Intelligent Manufacturing. 2019, 1(2): 83-88.
- [8] 王龙兴. 2019 年中国半导体材料业的状况分析[J]. 电子技术, 2019, 48(1): 16-18.
- WANG L X. Analysis on the situation of China's semiconductor material industry in 2019[J]. Electronics, 2019, 48(1): 16-18.
- [9] SEMI C30-1110, Specifications for hydrogen peroxide[R/OL]. (2010-11-1) [2022-03-08]. <https://store-us.semi.org/products/c03000-semi-c30-specification-for-hydrogen-peroxide?variant=21277570433083>.
- [10] MARCHEGANI F, FERRELLA F, NISI S. Material screening with mass spectrometry[J]. Physics, 2021, 3(1): 71-84.
- [11] CARTER S, CLOUGH S, FISHER A, et al. Atomic spectrometry update: Review of advances in the analysis of metals, chemicals and materials[J]. Journal Analytical Atomic Spectrometry, 2017, 32, 2068-2117.
- [12] KOROTKOVA N A, PETROVA K V, BARANOVSKAYA V B. Analysis of cerium Oxide by mass spectrometry and optical emission spectrometry with inductively coupled plasma[J]. Journal of Analytical Chemistry, 2021, 76(12): 1384-1394.
- [13] VINS M, VIERERBL L, KLUPAK V, et al. Determination of impurities concentration inside the silicon monocrystal by the neutron activation analysis[C]// International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods & Their Applications. Marseille: IEEE, 2014.
- [14] VOROTYNTSEV A V, PETUKHOV A N, TRUBYANOV M M, et al. Progress and perspectives in high-purity substance production for semiconductor industry[J]. Reviews in Chemical Engineering, 2021, 37(1): 125-161.
- [15] GONZALEZ-GAGO C, SMID P, HOFMANN T, et al. Investigations of matrix independent calibration approaches in fast flow glow discharge mass spectrometry[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2019, 34(6): 1109-1125.
- [16] BRWOLF F, FURSENKO O, ZAUMSEIL P, et al. Dynamic SIMS, spectroscopic ellipsometry and X-Ray diffractometry analysis of SiGe HBTs with Ge grading[J]. Semiconductor Science and Technology, 2018, 34(1): 014005.
- [17] PLATIAS S, VATALIS K I, CHARALABIDIS G. Innovative processing techniques for the production of a critical raw material the high purity quartz[J]. Procedia Economics and Finance, 2013, 5: 597-604.
- [18] HUES S M, LOVEJOY L. Ultratrace impurity analysis of wafer surfaces[M]//Handbook of Silicon Wafer Cleaning Technology. Norwich: William Andrew Publishing, 2018: 701-741.
- [19] ENG H H, YEO W T, ER E, et al. Measuring of phosphorous in silicon wafers by VPD-ICPMS[C]//2016 IEEE 23rd International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA). Singapore: IEEE, 2016: 178-179.
- [20] YONEZAWA S, DOBASHI K, ICHINOSE T, et al. Development of extreme microanalysis technology for metallic impurity on a silicon wafer surface[C]//2018 International Symposium on Semiconductor Manufacturing (ISSM). Tokyo: IEEE, 2018: 1-4.
- [21] BEEBE M, ANDERSON S. Monitoring wafer cleanliness and metal contamination via VPD ICP-MS: case studies for next generation requirements[J]. Microelectronic Engineering, 2010, 87(9): 1701-1705.
- [22] KIMURA H, TSUJINAKA N, KATOU T. Study on ultra-trace metal analysis in organic solvent by re-dissolved method and direct method[C]//2020 International Symposium on Semiconductor Manufacturing (ISSM). Tokyo: IEEE, 2020: 1-4.
- [23] 殷霞. 高纯氢氟酸和四甲基氢氧化铵中痕量杂质检测技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- YIN X. Research about analytical techniques of trace impurities of the high-purity hydrofluoric acid and tetramethylammonium hydroxide[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [24] SAKAI K, KOBAYASHI R, MIZOBUCHI K, et al. Analysis of organic solvent samples by automatic standard addition method using ASAS-ICP-MS/MS[EB/OL]. (2017-10-17) [2022-03-08] https://icpms.labrulez.com/labrulez-bucket-strap-h3hsga3/APWC_2017_K03_Kazu_Saka_final_cd85360dc9/APWC_2017-K03-Kazu-Saka-final.pdf.
- [25] 严煜, 韩乃旭, 卢水森, 等. 工业在线-电感耦合等离子体发射光谱法分析湿法冶炼硫酸锌溶液中铜钴镍铁[J]. 岩矿测试, 2022, 41(1): 153-159.
- YAN Y, HAN N X, LU S M, et al. Industrial On-line ICP-OES analysis of copper, cadmium, cobalt and iron in hydrometallurgical zinc sulfate solution[J]. Rock and Mineral Analysis, 2022,

-
- 41(1): 153-159.
- [26] WANG C H, HUANG C Y, YAK H K, et al. Identifying an unknown compound in flue gas of semiconductor industry-Forensics of a perfluorocarbon[J]. *Chemosphere*, 2021, 264: 128504.
- [27] 马晓轩. 超高纯氨中痕量水检测方法的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2013.
- MA X X. Studies on methods for determining the trace moisture in ultra-high purity ammonia[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2013.
- [28] LIU J J, ZHANG L Y, FAN J J, et al. Semiconductor gas sensor for triethylamine detection[J]. *Small*, 2022, 18(11): 2104984.