

Research Review on the Production Process Modeling and Control of Silicon Single Crystal Polishing Wafer

Xiwang Yang Furong Cheng

Zhejiang Haina Semiconductor Co., Ltd., Quzhou, Zhejiang, 324300, China

Abstract

semiconductor is the “heart” of electronic information products, in the various aspects of national economy and social life is more and more widely used, to the national economic growth, national defense security, core competitiveness is crucial, promote the communication, computing, medical health, military system, logistics, the development of new energy industry, guide the artificial intelligence, big data, the rise of new industries such as autopilot, supporting the digital economy development. As the thickness of the silicon wafer increases and the thickness of the chip decreases, the silicon wafer needs to be removed during the manufacturing process, so improving its production efficiency has become a part of the focus of attention. Because the process of chemical mechanical polishing is very complicated, and the quality of silicon wafer after polishing will be subject to many variables, this paper mainly discusses the modeling and control of silicon single crystal polishing wafer production process through chemical mechanical polishing and plasma assisted polishing.

Keywords

chemical mechanical polishing; plasma assisted polishing; silicon single crystal; polishing sheet

硅单晶抛光片生产过程建模与控制研究综述

杨希望 程富荣

浙江海纳半导体股份有限公司, 中国·浙江 衢州 324300

摘 要

半导体是电子信息产品的“心脏”，在国民经济和社会生活各方面的应用越来越广泛，对国家经济成长、国防安全、核心竞争力提升至关重要，促进了通信、计算、医养健康、军事系统、物流、新能源行业的发展，引导人工智能、大数据、自动驾驶等新产业的兴起，支撑着数字经济不断发展。随着硅片的厚度增加并伴随着芯片厚度的减少，硅片在制造过程中需要移除更多的物质，因此提升其生产效能成为了关注的焦点之一。由于化学机械抛光的过程非常烦琐，并且抛光后的硅片品质会受制于许多变数，因此论文主要通过化学机械抛光和等离子辅助抛光来探讨硅单晶抛光片生产过程建模与控制。

关键词

化学机械抛光；等离子辅助抛光；硅单晶；抛光片

1 引言

通常硅片可以被划分为单晶硅和多晶硅两类。制作硅片的过程包括单晶硅、多晶硅的生产步骤和加工步骤。不同的硅片生产商在制造硅片时会会有所区别。单晶硅片是一种高纯度的硅材料，具有均匀的结构和优异的电子性能。它在半导体工业中被广泛应用，作为制造集成电路和太阳能电池等器件的基板材料。单晶硅片的生产过程经历了多个步骤，其中抛光是关键的工艺之一，因此本综述旨在研究硅单晶抛光片生产过程建模与控制。

2 单晶硅片生产工艺流程

单晶硅片的生产工艺流程主要包括原料准备、单晶生长、切割和抛光等步骤。以下是单晶硅片的典型生产工艺流程：

①原料准备：选择高纯度的硅作为原料，并进行精细处理和净化，以去除杂质和控制纯度。通常采用氯化法或硅烷法来制备高纯度的硅。

②单晶生长：将净化后的硅原料放入高温炉中，通过控制温度和气氛条件，使硅原料逐渐熔化并结晶成单晶体。常用的单晶生长方法有 Czochralski 法和浮区法等。

③切割：将生长好的单晶硅棒进行切割，得到所需尺寸的硅片。通常使用钻石线锯进行切割，确保硅片平整和精确的尺寸。

④抛光：对切割好的硅片进行机械研磨和化学机械抛

【作者简介】杨希望（1967-），男，中国江苏徐州人，本科，高级工程师，从事工业电气自动化研究。

光,使硅片表面变得平整光滑,并满足特定的表面质量要求。

⑥清洗和检查:完成抛光后,对硅片进行彻底的清洗,去除抛光液和残留物。然后对抛光后的硅片进行严格的质量检查,包括表面平整度、厚度均匀性、晶体结构等方面的评估。

⑦附加处理:根据需要,对单晶硅片进行一些附加的处理步骤,如薄化、掺杂、氧化等,以满足特定的器件制造需求。

⑧封装:最后将加工好的单晶硅片用适当的封装材料进行封装,以保护硅片表面和内部结构,并提供电连接和机械支持。

3 单晶硅片的抛光过程

抛光是单晶硅片制备过程中非常重要的一步,它的目的是使硅片表面变得平整光滑。下面是单晶硅片抛光的基本步骤:

①机械研磨:使用机械磨床对单晶硅片进行粗磨,去除表面的粗糙度和缺陷。通常采用研磨液和研磨片进行研磨,通过不断地研磨和冲洗来逐渐去除硅片表面的不平整部分。

②化学机械抛光:在机械研磨后,将单晶硅片放置在抛光机中进行化学机械抛光。这个过程通过将硅片浸泡在特定的抛光液中,并在旋转盘上施加力量,使硅片表面进一步平整化。抛光液通常包含有机酸、氧化剂和磨料等成分,能够去除硅片表面的微观凹凸。

③清洗和检查:完成抛光后,对单晶硅片进行清洗,去除抛光液和残留物。然后对抛光后的硅片进行严格检查,以确保表面质量达到要求。

4 硅单晶抛光片生产过程建模与控制研究方法

4.1 化学机械抛光

为确保优质的基础材料,学者们已经提出了一系列高级精细研磨技术。然而,当前最有效的并且经常使用的单晶硅超精细化处理方式就是化学机械抛光,它也成了单晶硅基础材料制造过程中的最后一环,这是决定最终产品是否具有完美无瑕的外观、没有缺陷和损坏的关键步骤。化学机械抛光是一种基于与待加工基材相适应的抛光剂在其表面产生迅速的化学反应,生成一种比基底更柔软、韧性和附着力都比较弱的表层硬化膜的过程。通过抛光布和待加工基材之间相互移动,并利用抛光剂中含有的磨料和抛光布对基材表面进行物理清除,从而减少抛光压力以获取更高质量的产品表面。这种方法依赖于磨料和化学的作用共同达到少量的物质移除,这可以防止仅靠机械抛光带来的伤害和仅仅只用化学抛光导致的抛光效果不好、平面度和平行度不足等问题。

传统化学机械抛光原理见图1。

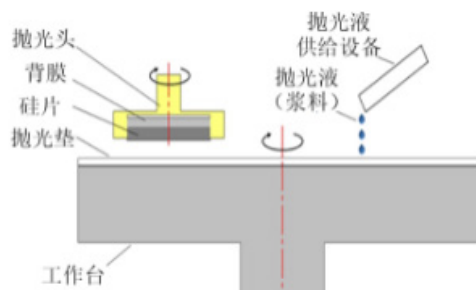


图1 传统化学机械抛光原理图

化学机械抛光工艺融合了化学与机械抛光的技术特性。其解决了单纯化学抛光中出现的表面的平滑性和对齐问题,同时也弥补了纯粹机械抛光所带来的表面粗糙程度高及深度损伤厚的不足。这种方法能在保证高质量表面效果的前提下,同时保持一定的工作效率,因此被认为是最适合全面改善基板平面度的有效手段^[1]。化学机械抛光拥有许多显著的优势:①能对多种材料和表面进行整体平坦化,包括但不限于多层金属互连介质中的绝缘体、导体等不同材料的全局平坦化。②可以同时在一次化学机械抛光过程中,对各类材料进行平整处理。③能够修复材料表面的瑕疵,降低表面波动性,优化表面形状,提升集成电路产品的稳定性。④在化学机械抛光的过程中,不会释放有害气体,对人体健康的影响较小。

4.2 等离子辅助抛光

伴随着5G及电动汽车科技的进步,传统的硅半导体已经不能充分适应新的需求,而作为新一代半导体技术的代表——碳化硅则展现出更强的竞争力,预示着未来的广阔应用前景。不过,对于目前的高精度制造工艺来说,如何提高碳化硅晶片的抛光效果并提升其抛光速度成为了一大难题。论文所提出的PAP技术是通过利用等离子体化学处理来达到快速且有效的去污目的,这种方式具备了较高的除尘率、可以生成接近原子的平面表层并且不会造成次生损害等问题^[2]。

2010年,大阪大学的Yamamura首次提出了机械研磨法可以高效加工单晶硅,但由于机械摩擦的性质,加工后表面会产生划痕和亚表面损伤。相比之下,等离子体化学蒸发加工技术的去除原理是化学反应,可以实现无损伤加工。然而,该技术的材料去除效率较低且去除过程呈各向同性,导致其在原子尺度的平整能力较弱。为了提高单晶硅的加工效率并避免亚表面损伤,等离子辅助抛光技术结合了两种技术的优势。等离子辅助抛光技术中的等离子体仅用于表面改性,材料去除过程依赖于软磨料的摩擦作用,因此在原子尺度上具有良好的平整能力和较高的表面质量。该技术的原理见图2,首先通过等离子体照射单晶硅表面,等离子体中的自由基具有强氧化性,与单晶硅表面反应,形成硬度较低的改性层,然后使用软磨料抛光去除该改性层。由等离子体化学改性和软磨料抛光去除交替进行,对粗糙表面进行处理,

使其逐渐变得平滑，最终得到一个不受损伤的原子级平坦表面。

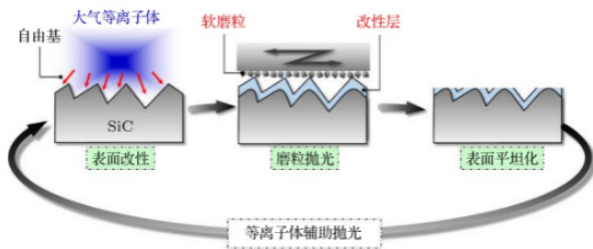


图2 等离子辅助抛光原理图

然而，在等离子辅助抛光过程中，单晶硅基片的MRR受到了由等离子体生成的活化自由基与研磨剂的物理清除效果的影响。因为活性自由基产生速度相对较低，因此其在基板表面的形成速度也相应地降低；由于使用的是柔韧研磨剂来消除，所以使得单晶硅基片的MRR表现出极高的值；实验装置的价格较高且制造费用较大，这也阻碍了等离子辅助抛光技术对于单晶硅基片的处理及运用。

5 化学机械抛光技术的发展方向

因为拥有卓越的物理化学特质，单晶硅得到了广泛的使用。然而，尽管有许多种类的化学机械抛光技术可用于处理单晶硅，它们的加工效能各异且结果不同。但是，单晶硅稳定且不变的化学特性，这些方法对于基片的化学影响相对微弱，这使得它们无法实现化学反应和机械效应之间的协调，从而降低了抛光速度、产生了表面质量的不一致、增加了生产成本并阻碍了大规模生产的实施等一系列问题^[1]。因此，为了解决这一系列的问题，我们需要从以下几个方向着手：

①对单晶硅的氧化过程进行深度探索，寻找具有高效稳定性和强烈化学反应的抛光液，以实现化学与机械的协同作用，从而获得高质量的基片。

②研究能够自我催化的抛光垫，这样在处理单晶硅时，可以延长其使用寿命，提高其催化性能，同时降低加工费用。

③利用最新的超精密加工技术，基于理论可操作性，研发出一系列新型单晶硅基片的化学机械复合抛光方法，以提升材料去除效率和表面质量。同时，这些方法也被应用在诸如GaN、蓝宝石等新兴光电晶片的超精密处理中。

④利用机器人和自动控制等理念，研发一系列能够通过编程、PLC、AI等手段操作的新型化学抛光设备，以达到精确、细致、智能和环保的加工效果。

6 结语

综上所述，单晶硅片生产过程中的每个步骤都至关重要，其中抛光作为关键工艺之一，能够显著提升硅片的表面质量和性能。通过精细的抛光过程，可以使单晶硅片具有更高的平整度、较低的表面缺陷和更好的晶体结构，从而为后续器件制造提供优秀的基板材料。虽然新型半导体制程中单晶硅是被广泛认可的新兴材质之一，但是因为它是一种难以处理的产品类型，所以如何有效地利用这种产品来提高它的品质并降低成本以满足大规模市场的需求就显得尤为重要。为了达到这个目标，我们需要研究一系列复杂的过程，从原始原料到最终产品的整个流程中的各个阶段，都需要经过严格控制，才能保证最后成品的效果符合预期标准。而这些过程中最重要的是硅单晶抛光片生产过程的建模与控制，这一部分的工作决定着该制品能否顺利进入下一步制备工作或者是否能够成功投入使用。尽管目前的技术目前仅能产生较为简单的周期性原子尺度结构，但随着进一步深入研究，该技术定将在原子尺度制造领域展现出广阔的应用前景。本综述旨在抛砖引玉，引起更多科研人员对硅单晶抛光片生产过程建模与控制技术的关注和重视。

参考文献

- [1] 卞达,宋恩敏,倪自丰,等.基于响应面法的单晶硅CMP抛光工艺参数优化[J].金刚石与磨料磨具工程,2022,42(6):745-752.
- [2] 张晨.SiC单晶超声辅助电解液等离子体抛光仿真及实验研究[D].西安:西安理工大学,2023.
- [3] 张淞铭.半导体单晶抛光片清洗技术分析[J].电子测试,2018(18):129+131.