

Silicon Parts Used in Ic Etching Manufacture and New Development

Liming Ku, Qinfa Zhu, Haibin Chen, Dujuan Bai, Qinghua Xiao, Zhirui Yan

GRINM Semiconductor Materials Co., Ltd., General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing
Email: cookiefile@126.com

Received: Jul. 9th, 2020; accepted: Jul. 22nd, 2020; published: Jul. 29th, 2020

Abstract

The line width below 28 nm, especially 7 nm, not only requires higher performance of large silicon wafers, but also puts forward higher requirements for silicon parts used in etching tool, such as the uniformity of the surface of silicon ring, mechanical damage and morphology of silicon electrode hole, etc. Silicon parts for 7 nm line width will need more refined process, and multi-step precision grinding instead of lapping, which can not only improve the flatness and roughness, but also reduce the damage layer on the surface, especially the sub-surface. We can use an improved drilling method to solve the problem of mechanical damage. This paper discusses the processing flow of silicon parts and points out the latest development of silicon parts.

Keywords

Etch, Silicon Parts, Silicon Ring, Silicon Electrode, Grinding, Mechanical Damage

集成电路刻蚀用硅部件加工及最新发展

库黎明, 朱秦发, 陈海滨, 白杜娟, 肖清华, 闫志瑞

北京有研科技集团有研半导体材料有限公司, 北京
Email: cookiefile@126.com

收稿日期: 2020年7月9日; 录用日期: 2020年7月22日; 发布日期: 2020年7月29日

摘要

集成电路芯片28 nm以下特别是7 nm线宽不仅对大硅片各项性能要求越来越高, 对刻蚀机上用的硅部件也提出了更严格的要求, 例如硅环表面的均匀性, 硅电极微孔内壁机械损伤和微孔表面形貌等。在加工方法上, 7 nm线宽用硅部件将采取更精细化的加工, 用多步精磨削代替磨片, 不仅可以提高平面度和粗

精度，还可以减少表面特别是亚表面的损伤层；硅电极采用改进后的打孔方式，解决微孔内壁机械损伤的问题，同时采取特殊的损伤检测方法来指导制造工艺的优化。本文对硅部件产品的加工流程进行了论述，指出了硅部件加工的最新发展趋势。

关键词

刻蚀，硅部件，硅环，硅电极，磨削，机械损伤

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

集成电路芯片是信息技术产业最重要的基础性部件，被誉为电子信息产品的“心脏” [1]。伴随 5G 通讯、人工智能、大数据、自动驾驶、物联网、工业自动化等新兴产业的崛起，近年来我国半导体产业投融资热潮持续高涨，大硅片需求旺盛，在供给方面，实现硅材料国产化、保障关键核心材料供应安全获得产业内大力支持。我国集成电路发展势头迅猛，带动半导体硅材料的发展，例如 12 英寸大硅片、刻蚀用硅部件制品等。

刻蚀用硅部件包括硅环和硅电极，主要用于 8~12 英寸等离子刻蚀机上。在集成电路制造过程中，刻蚀晶圆的同时也对硅部件进行刻蚀，高纯硅部件和晶圆均为硅材料，刻蚀电学性能更加均匀，因此硅部件制品广泛用于半导体刻蚀机中。硅部件制品周期性消耗，成为晶圆加工过程的重要零部件耗材，比如一个硅环在加工约 200 片晶圆后就需要更换，直接影响晶圆的电学性能。硅部件制品市场需求主要受芯片厂晶圆加工能力驱动，按全球目前晶圆生产情况，全球年需求 8 寸硅环和硅电极数量分别约 30 万片和 7 万多片，12 寸环片硅电极数量分别约 50 万片和 10 万片，市场规模总计约 40 亿人民币。目前硅部件制品市场主要依靠进口，现有市场日本和韩国制造厂商为主，占据市场 80% 以上份额。刻蚀机示意图如图 1：

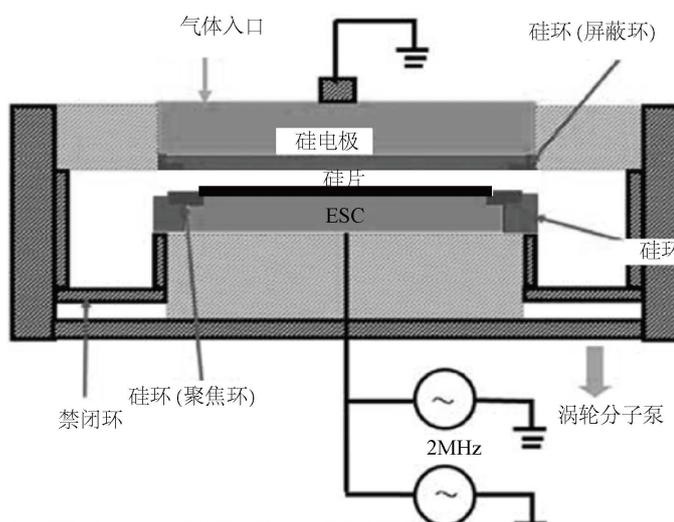


Figure 1. Schematic diagram of the etching machine

图 1. 刻蚀机原理示意图

现阶段 12 英寸硅片技术正在向极端精细化发展，全球大尺寸硅片的领先水平已达到 7 nm，主流应用在 28~16 nm，7 nm 商业需求已显现，未来几年 7 nm 需求将成为主流。线宽的不断变小给硅部件加工提出了越来越高的要求，更小线宽对硅部件制品的要求主要体现在参数精确控制上，如表面及边缘粗糙度、真圆度、硅电极微孔内部机械损伤厚度和微孔边缘形貌等，这就要求硅部件厂家不断优化工艺，从更微观的方面进行思考如何加工过程工艺的控制。

2. 硅部件制品加工流程

通过对大直径硅单晶棒进行精密加工来获得所要求的硅制品，加工工序主要分为单晶拉制和机械成型两部分。硅环加工流程如下图 2：

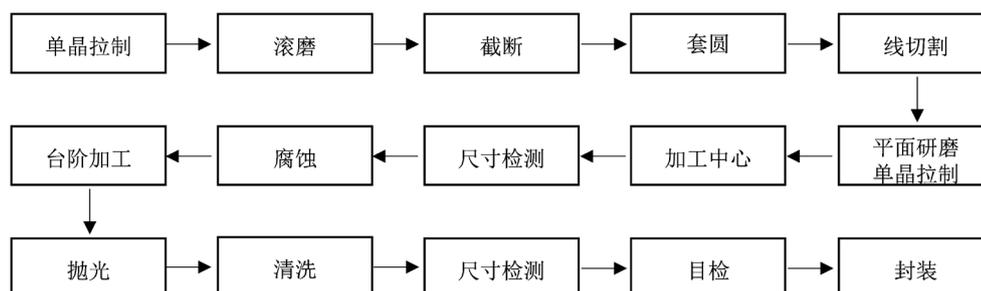


Figure 2. Manufacturing process of silicon ring
图 2. 硅环加工流程图

硅电极和硅环的加工基本相同，主要是增加了打孔工序。硅电极打孔时硅电极安装到打孔机上，使用金刚石钻头打孔，打孔后再对电极表面进行研磨和腐蚀，去除表面的机械损伤。钻头直径一般为 0.4 mm，钻头部分喷涂金刚石颗粒，提高钻头寿命，加工后的微孔直径一般要求 0.4~0.6 mm，微孔的质量好坏直接决定电极的成品率。硅电极加工流程如下图 3：

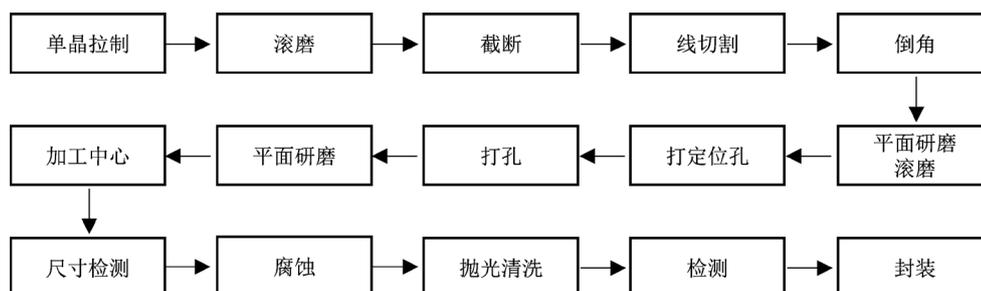


Figure 3. Manufacturing process of silicon electrode
图 3. 硅电极加工流程图

图 2 和图 3 中，每道加工工序后均有清洗工序去除机械加工带来的油污和硅渣残留。在单晶拉制过程中，主要是通过设计热场结构和拓宽晶体生长工艺窗口，控制滑移缺陷和电阻率参数，拉制出无滑移位错的单晶，电阻率一般要求 1~5 欧姆·厘米和 60~80 欧姆·厘米，使之满足集成电路刻蚀机用硅部件制造的要求。机械成型主要是通过滚磨、截断、线切割、磨床和加工中心对硅晶棒进行机械处理，加工成硅环或硅电极需要的环状或圆片状，然后通过平面研磨来去除线切割带来的表面切割纹和降低表面机械损伤和微裂纹，研磨后平面度 < 10 μm，再通过腐蚀和抛光处理来降低表面粗糙度，进一步去除因机

械加工带来的机械损伤。加工中心主要加工内外径的形状，如内外径 R/C 倒角、内径台阶、内径参考面等，尺寸精度要求 ± 0.1 mm。腐蚀工序使用混酸腐蚀(HF 55%:HNO₃ 60%:CH₃COOH 99.5%)，去除硅部件表面和硅电极微孔内壁的机械损伤。抛光一般采用双面抛光，使表面达到一定的粗糙度和光洁度。

3.7 nm 线宽用硅部件技术的发展趋势

3.1. 平面研磨

因线切割的本身原因，硅部件半成品表面会有线切割带来的波纹以及较大的损伤层，线切割后需要进行表面研磨。为了去除表面的线切割纹，一般采用磨片进行加工，研磨后平面度小于 20 微米。随着集成电路进入 7 nm 技术水平，对硅部件表面的粗糙度和内径台阶尺寸要求越来越高，磨片因同时加工正面和背面，不能精确控制正面台阶的尺寸，因此到 7 nm 技术水平及以下，磨片将被磨削代替，一般采用粗磨削(300~600#金刚石砂轮)和精磨削(1200#)，在加工中心工序后再采用二次精磨削(2000#)，在去除表面加工中心工序带来的划伤的同时，进一步降低表面粗糙度，磨削后表面光洁度较好，更有利于腐蚀的均匀性[2]。磨片和磨削后表面粗糙度如图 4，磨片后表面粗糙度一般在 0.4 微米。损伤层深度可以通过化学方法进行测试[3]，损伤层深度大约 24 微米[4]，并且在磨片过程中磨砂对表面是刚性去除，很容易在次表面产生细微裂纹[5]。经过三次磨削后表面粗糙度约为 0.02 微米，采用多步磨削后的表面相比磨片表面粗糙度水平有较大的提高。

加工后表面显微镜图如图 5，磨削后表面更加均匀，磨削后损伤小于 5 微米[6]，损伤层在后续腐蚀过程中能被去除。

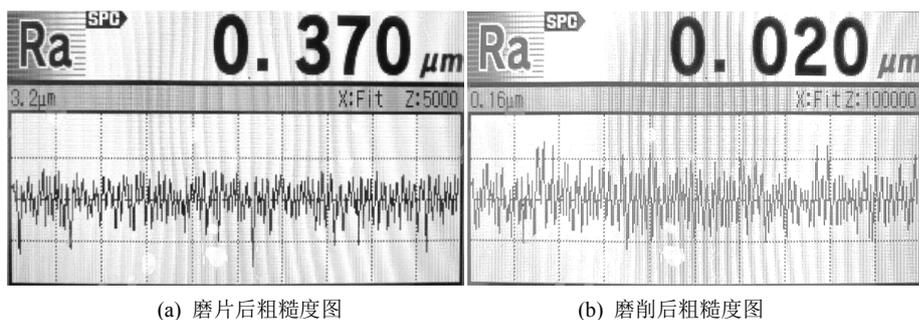


Figure 4. Surface roughness chart of silicon parts after lapping and grinding

图 4. 磨片和磨削后表面粗糙度图

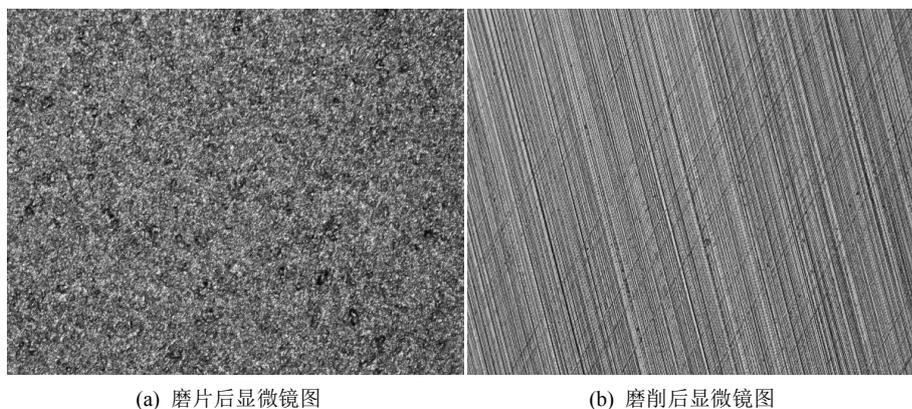


Figure 5. Surface morphology image of silicon parts after lapping and grinding

图 5. 磨片和磨削后表面形貌

3.2. 硅电极打孔技术

在刻蚀过程中，硅电极的主要作用是用于反应体气体通过微孔均匀进入反应腔体内，微孔尺寸、分布和内壁质量对刻蚀产品电学性能有直接的影响。硅电极表面分布有 300~900 个微孔，打孔时使用直径为 0.4 mm、长度为 11.5 mm 的金刚石钻头，而硅电极一般厚度 10 mm，长径比 $L/D = 28.75:1$ ，这就导致深孔加工排屑困难、冷却效果差、刀具的磨损大、使用寿命短和微孔直径偏差大的问题，特别是打孔深度大，钻头部分到底端时抖动幅度大，导致微孔尺寸不规则，机械损伤深，为了克服这些问题，打孔工序采取双面打孔技术，如下图 6：

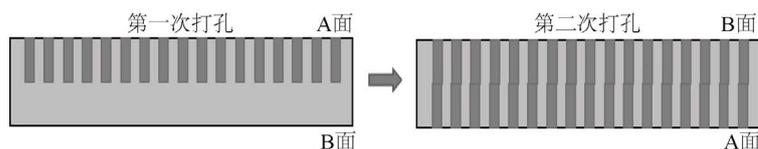


Figure 6. Schematic diagram of double side drilling
图 6. 硅电极双面打孔示意图

双面打孔技术难点是如何控制第二次打孔时所有微孔的偏移量，偏移量要求小于 0.1 mm，为了解决这一问题，需要使用特殊的工装，并且在打孔前安装半成品时要保证电极平面度、刀具跳动和设备加工工位的 XY 轴同心度。

3.3. 超声波加工技术

在加工中心和打孔机加工时均使用金刚石刀具，在高速旋转的同时对硅材料进行去除，金刚石刀具的排屑效果影响了加工效率和刀具的使用寿命，特别是硅电极打孔时深度大，微孔底部不易排屑，未来在硅部件加工中超声波加工技术将得到广泛的应用。超声波加工使刀具与硅部件接触，金刚石刀具在轴向高频振动，刀具因振动而很好的把切削下来的硅渣排出去，减少加工阻力，降低表面机械损伤厚度，能大幅度改善表面加工质量，超声波主轴加工示意图如下图 7：

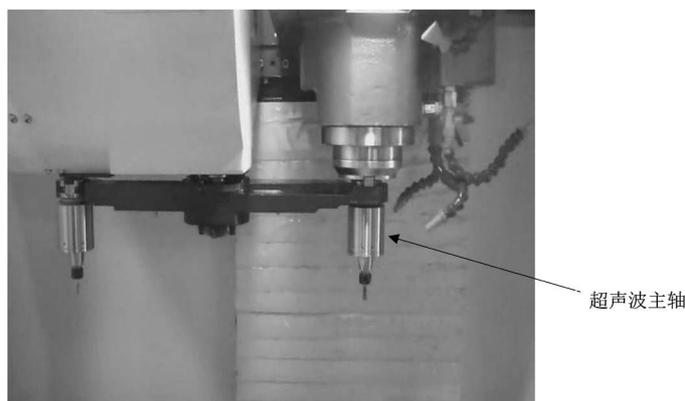


Figure 7. Schematic diagram of drilling
图 7. 超声波打孔示意图

3.4. 硅电极微孔机械损伤测试技术

在集成电路刻蚀时，硅电极微孔内表面质量对晶圆质量至关重要，例如颗粒沾污和微孔表面机械损伤在气体的带动下进入反应腔体，导致等离子电弧打火，造成晶圆的报废。微孔直径一般为 0.5 mm，普

通的机械损伤测试手段很难对微孔内壁的机械损伤进行表征，我们可以通过对硅电极进行解理，用显微镜对微孔内部机械损伤进行测试，通过测试结果对打孔工艺优化进行指导。打孔后将电极进行腐蚀，腐蚀去除量一般为 0.1 mm，微孔内壁机械损伤的深度小于 0.05 mm 时，在下一步腐蚀过程中机械损伤将会被去除。通过解理的方法，微孔内壁机械损伤测试结果如下图 8：

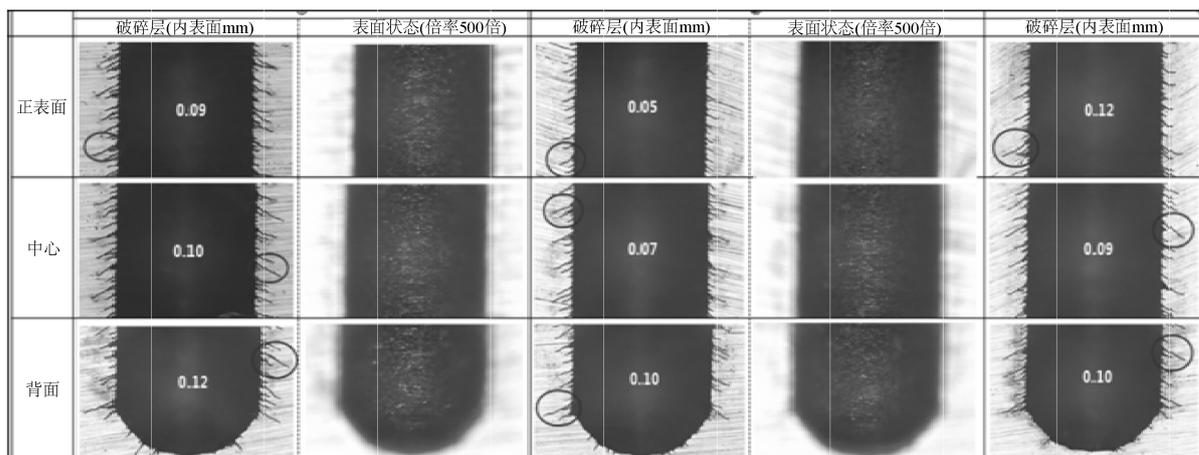


Figure 8. Morphology image of mechanical damage in silicon electrode hole

图 8. 硅电极微孔内机械损伤测试形貌图

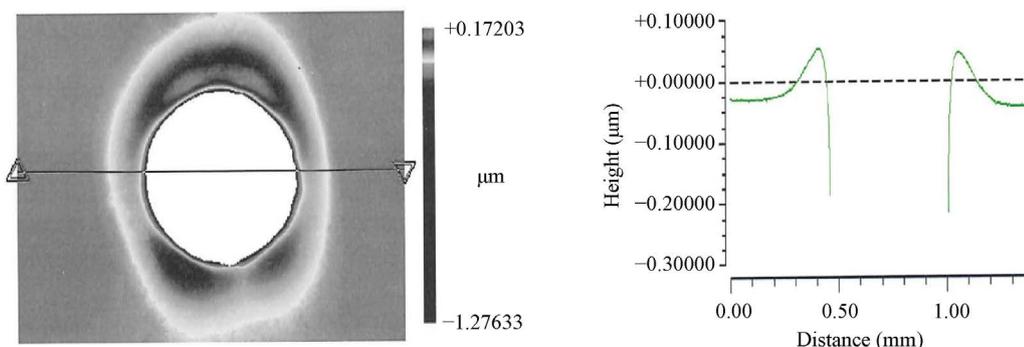
3.5. 硅电极微孔倒角技术

硅电极微孔除了内壁质量外，正表面的微孔形貌也是一个很重要的参数。在刻蚀过程中，气体通过硅电极微孔达到腔体时开始进行刻蚀，在硅电极和等离子界面处，如果微孔表面呈凸起状，凸起部分很快会被等离子体剥落引起电弧打火，因此微孔要求有 0.1 mm 的倒角，如下图 9。

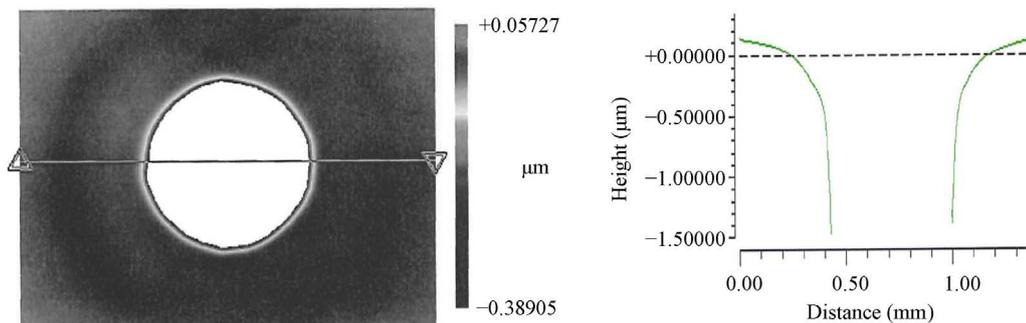
为了达到微孔边缘倒角的效果，要优化磨削工艺，采用更细的磨削砂轮，提高表面的粗糙度水平，腐蚀时优化混酸的配比，进一步提高表面的光洁度，同时采取特殊抛光技术，精确控制硅电极表面各点抛光去除量。

4. 结语

硅部件作为刻蚀工序的重要硅材料，对晶圆刻蚀后的电学性能有非常重要的影响，特别是集成电路进入 7 nm 时代，对硅部件各项参数要求越来越高，因此需要对每一工序进行更微观更细致的考虑，以期获得更加精密的结果。本文对目前硅部件的每一道加工工序流程及最新发展进行了详细的讨论，指出了



(a) 微孔边缘无倒角形貌图



(b) 微孔边缘有倒角形貌图

Figure 9. Edge morphology image of silicon electrode hole**图 9.** 硅电极微孔边缘形貌图

硅部件加工工序的发展趋势，特别是 7 nm 技术的一些加工流程及方法的最新发展，希望能对集成电路刻蚀用大尺寸硅部件制造的相关技术人员有一定的帮助。

基金项目

国家科技部(课题编号：2017YFB0305603)。

参考文献

- [1] 陈海滨, 闫志瑞, 库黎明, 等. 区熔法拉制硅单晶中多晶棒化刺工艺探讨[J]. 材料科学, 2020(10): 234-237.
- [2] 田业冰, 郭东明, 康仁科. 大直径硅片自旋转磨削的实验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2004(4): 1-4.
- [3] 彭晶, 包生祥, 马丽丽. 单晶表面加工损伤的评价方法[J]. 材料导报, 2006(9): 101-103.
- [4] 刘峥, 翟富义, 张椿, 等. P<111>硅磨片表面损伤的研究[J]. 稀有金属, 1997(3): 50-53, 142-143.
- [5] Zarudi, I. and Zhang, L.C. (1998) Effect of Ultraprecision Grinding on the Microstructural Change in Silicon Monocrystals. *Journal of Materials Processing Technology*, **84**, 149-158. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00090-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00090-9)
- [6] 陈海滨, 周旗钢, 万关良, 等. 300 mm 双面磨削 Si 片损伤层检测[J]. 稀有金属, 2006(zl): 50-53.