

表面质量控制及检测

雾化施液抛光硅片位错的化学腐蚀形貌分析

壮筱凯, 李庆忠

(江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: **目的** 研究硅片经雾化施液抛光技术加工后存在的位错缺陷。**方法** 应用化学腐蚀法、光学方法分析硅片不同部位的位错腐蚀形貌、位错密度及其分布,通过单因素实验研究雾化参数对位错形貌和位错密度的影响规律。在相同的工艺参数下,和传统抛光进行对比实验。**结果** 雾化抛光硅片的平均位错密度为 $1.2 \times 10^4 / \text{cm}^2$,边沿处的位错密度小于其他区域。在相同的工艺参数下,雾化施液 CMP 的抛光液消耗量约为传统 CMP 的 1/10,但硅片的位错腐蚀形貌和位错密度明显好于传统抛光,且蚀坑分布均匀分散,没有出现位错排等严重缺陷。通过增大雾化器的出雾量能有效改善硅片表层的位错缺陷。**结论** 相对于传统抛光,雾化施液抛光技术能更加高效地去除硅片的位错缺陷。

关键词: 雾化施液; 硅片; 位错腐蚀坑; 传统抛光; 雾化参数

中图分类号: TG175 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2015)05-0129-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.05.024

Chemical Corrosion Morphology Analysis of Dislocations of Silicon Wafer Polished by Ultrasonic Atomization CMP

ZHUANG Xiao-kai, LI Qing-zhong

(College of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: Objective To study the dislocation defect of silicon wafer which was polished by ultrasonic atomization chemical mechanical polishing (CMP). **Methods** The chemical etching method and optics method were used to analyze the morphology, density, and distribution of the dislocation etch pits. Besides, the influence of atomization quantity on the morphology and density of dislocation was studied by single factor experiment. Then comparative experiments were conducted with traditional CMP under the same conditions. **Results** The average dislocation density of the polished silicon wafer was about $1.2 \times 10^4 / \text{cm}^2$ and the dislocation density in edge area was lower than other areas. Besides, the dislocation morphology and dislocation density of silicon wafer polished by ultrasonic atomization CMP were obviously better than those treated by traditional CMP under the same conditions while the

收稿日期: 2015-01-19; 修订日期: 2015-02-05

Received: 2015-01-19; Revised: 2015-02-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51175228)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51175228)

作者简介: 壮筱凯(1990—),男,江苏人,硕士研究生,从事摩擦学及表面工程研究。

Biography: ZHUANG Xiao-kai(1990—),Male, from Jiangsu, Master graduate student, Research focus: tribology and surface engineering.

通讯作者: 李庆忠(1965—),男,吉林人,博士,教授,硕士生导师,主要从事摩擦学、精密及超精密加工等研究。

Corresponding author: LI Qing-zhong(1965—),Male, from Jilin, Ph. D., Professor, Master tutor, Research focus: tribology, precision and ultra-precision machining.

polishing liquid consumption was about one tenth of traditional CMP. The dislocation etch pits distributed evenly and there were no serious flaws such as dislocation piles and so on. In addition to that, the dislocation defect could be effectively improved by increasing the quantity of atomization. **Conclusion** Ultrasonic atomization CMP removed the dislocation defect of silicon wafer more efficiently than traditional CMP.

KEY WORDS: ultrasonic atomization; silicon wafer; dislocation etch pit; traditional CMP; atomization parameters

硅单晶是呈单晶体的半导体硅材料,产量大、应用广。随着计算机技术、网络和通讯技术的快速发展,对集成电路(IC)的要求越来越高,对IC芯片表面平整度的要求也越来越高^[1-2]。目前,CMP平坦化技术在浅沟槽隔离、层间介质膜和金属大马士革工艺中得到了广泛应用,基本满足了同时代的芯片制造对平坦化的要求,成为现代制造芯片的主流核心技术之一^[3-4]。然而传统的化学机械抛光在未来的应用中存在技术瓶颈。IC布线的特征尺寸小于22 nm后,理论上该传统方法将不再适用。

基于对国内外超精密平整化加工技术的研究现状和发展趋势的认识,雾化施液化学机械抛光被提出。研究人员发现雾化施液抛光后的工件表面质量与传统抛光的效果接近,而抛光液消耗量只有常规抛光液的1/10^[5]。但是对于抛光表面质量,抛光表层和亚表层损伤还未引起足够重视。位错是晶体中原子排列发生错误的一种线状缺陷,半导体晶体中如果存在的位错过多,对器件的制造十分不利。研究发现,大量的位错会造成PN结击穿特性变坏(软击穿、低击穿),影响半导体器件性能和成品率的提高;杂质沿着位错管道的扩散速度特别快,导致扩散结不平整和晶体管基区穿通等现象^[6]。目前国内关于晶体位错方面的报道仍然只局限于提拉法、温梯法、泡生法^[7-9],但是关于抛光技术对晶体位错影响的研究却很少有报道。本文采用改进的雾化施液CMP系统对研磨硅片的(111)晶面进行抛光,通过化学腐蚀的方法显示出硅片中的位错分布,和传统CMP进行位错密度和形貌的对比分析,研究雾化参数对位错的影响规律。

1 实验

首先将硅片切割成20 mm×20 mm的试件,采用改进后的雾化施液CMP实验系统^[10]进行抛光,如图1所示。将硅片用石蜡粘在载样盘上并套入导液加压一体装置内^[11],高频雾化后的抛光液通过负压作用被导入到抛光界面,雾液中的化学物质与硅片表面发生化学反应,并通过雾液中磨粒的机械磨削作用将反应物去除,最终在化学反应和机械磨削的交替作用

下形成超光滑精细表面。工艺参数为:环境温度25℃,抛光压力56 kPa,抛光盘转速50 r/min,雾化器电压45V,抛光垫材料为聚氨酯(φ381),摆动臂速度9次/min,抛光时间60 min,实验环境为千级超净实验室。

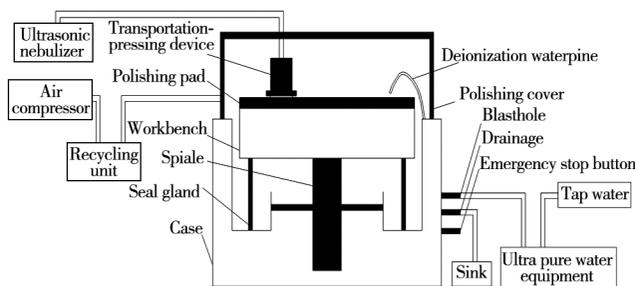


图1 超声波雾化施液CMP系统原理示意

Fig. 1 System principle diagram of ultrasonic atomization CMP

实验选择研磨硅片的(111)晶面。通过查阅相关资料,选择“杨氏”腐蚀液^[12]作为腐蚀剂。腐蚀温度为25℃,将腐蚀后的样品在光学显微镜下进行观察,研究位错的形貌、分布和密度,以及腐蚀时间和雾化参数对位错蚀坑的影响。

2 结果和讨论

2.1 腐蚀时间对位错蚀坑的影响

在用化学蚀刻法观测晶体表面的位错蚀坑时,腐蚀时间的长短对蚀坑的形貌有很大的影响。如果腐蚀时间过长,会导致硅片表面过度腐蚀,晶体内部完整的晶格也会受到化学试剂的腐蚀,导致缺陷的显示被掩盖或部分掩盖,影响观察的效果;腐蚀时间太短,则会导致硅片表面欠腐蚀,较弱的化学键没有被完全破坏,位错的蚀坑不明显,无法得到清晰的腐蚀坑图形。从图2可知,随着腐蚀时间的增加,位错的腐蚀坑也渐渐清晰,在3 min的时候,已经能观察到腐蚀表面出现了许多的位错坑,但是腐蚀坑太小还未能清晰地观察到蚀坑的形状;当腐蚀时间从8 min增加到13 min的时候,位错蚀坑进一步得到腐蚀,能隐约看到位错坑呈现三角形,但是形貌特征还不够明显;进

一步增加腐蚀时间至 17 min,这时已经能比较清晰地看到位错蚀坑呈现三角形,并且位错坑大小适中,比较适合观察位错形貌和密度。因此选定腐蚀时间为 17 min 为最佳腐蚀时间。

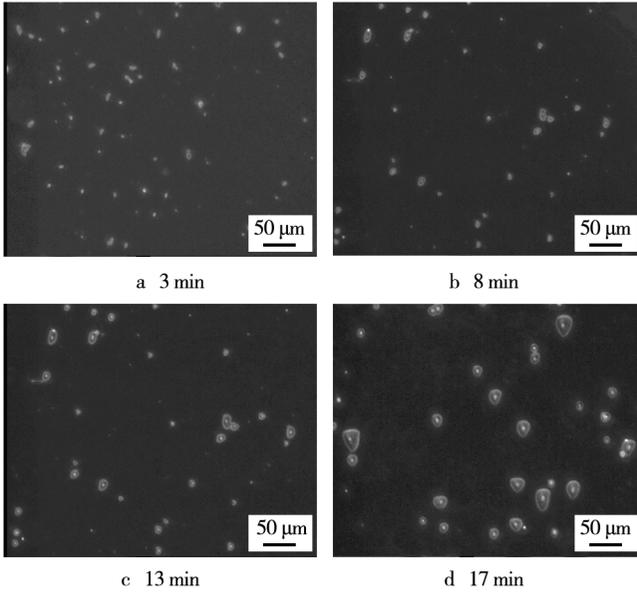


图2 不同腐蚀时间下的位错形貌

Fig.2 Morphologies of dislocation etch pits after different corrosion times

2.2 位错密度的统计与分布

位错密度是表征晶体中位错多少的一个物理量,指单位体积晶体内位错线的总长度,但是由于实验技术和实用的原因,通常都是用腐蚀坑法来对晶体的位错密度进行估计。腐蚀坑测定法对位错密度的定义是:单位晶体表面上的腐蚀坑数目,见式(1):

$$\rho = n/S \tag{1}$$

式中: ρ 为位错密度, S 为视场面积, n 为视场面积上观测到的腐蚀坑的数目。

在观测位错蚀坑的过程中发现位错的分布具有一定的随机性,选择不同的观测点进行位错密度的统计往往会导致很大的差异,因此在硅片表面随机取样 100 个点,通过对这些测点位错密度的统计绘制位错密度分布直方图,这样能更准确地观察硅片的位错密度和位错分布。从图 3 可以发现,雾化施液抛光后硅片的位错密度主要集中于 $1 \times 10^4 \sim 1.4 \times 10^4 / \text{cm}^2$,平均密度大约为 $1.2 \times 10^4 / \text{cm}^2$ 。此外在统计的过程中发现了少量的低位错密度区和高位错密度区,其中低密度区位于硅片的边沿处,高密度区位于硅片的中心区,如图 4 所示。苏建修^[13]在研究化学机械抛光过程中硅片表面接触载荷的分布时发现,硅片边沿处的

接触压力很高,这种现象造成边沿处材料去除率增大,晶体固有的位错缺陷层被大量去除,因此边沿处的位错密度要低于中心区。接下来对位错形貌的分析讨论中选择该两处的位错蚀坑光学显微图,并且和传统抛光硅片的位错形貌进行对比。

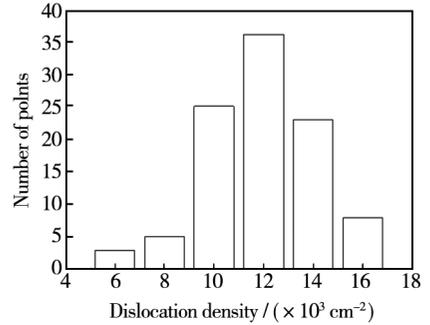


图3 雾化施液 CMP 抛光硅片的位错密度统计

Fig.3 Statistics of dislocation density of silicon wafer polished by ultrasonic atomization CMP

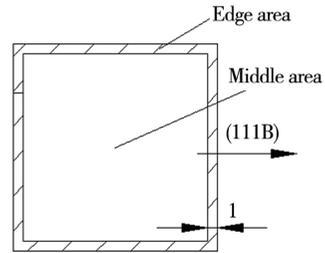


图4 位错密度分布示意

Fig.4 Sketch map of dislocation density

2.3 雾化抛光和传统抛光硅片 (111) 晶面的位错蚀坑形貌对比

在以 UNIPOL-1502 型抛光机为核心的抛光实验系统下,采用相同的工艺参数(抛光压力和抛光盘转速)进行雾化抛光和传统抛光试验,其中雾化 CMP 的抛光液消耗量(9.5 mL/min)大约为传统 CMP(100 mL/min)的 1/10,对两种抛光工艺下硅片边沿和中心处的位错蚀坑形貌进行对比分析。从图 5a 和图 5b 的位错蚀坑形貌图可以看出,雾化抛光的硅片中心处的位错蚀坑分布比较均匀和分散,位错蚀坑主要呈单个分布的三角锥体,少量蚀坑重叠在一起,反应了雾化抛光硅片的位错缺陷并不是很严重。传统抛光的硅片中心处的位错蚀坑分布比较密集,排列杂乱无序,蚀坑堆叠现象较多,并出现了少量的小角度晶界和位错排现象。其中位错排是指当晶体的滑移面受滑移切应力作用时,滑移面上的位错沿滑移方向运动。如果位错在晶体内运动过程中遇到障碍就要停

下来。第一个位错在障碍处停下来,建立它的应力场。第二个位错运动到第一个位错附近时,由于它们是同号位错,相互排斥,在一定的位错上停下来,而第三个位错会受到前两个位错的合成应力场的排斥停在较远的位置,由此就形成了位错由密到疏的排列,被称为位错塞积群^[14-15],如图6a所示。Koehler认为位错塞积会产生解理所需的应力集中,当塞积群顶端的应力 σ' 达到临界值时,将在塞积群顶端产生裂缝,见式(2):

$$\sigma' \approx 2\gamma/b \approx \frac{1}{5}\mu \quad (2)$$

式中: σ' 为塞积群顶端的应力, γ 为表面能, b 为Burgers矢量, μ 为切边模量。

裂缝的长大可以看成是塞积群的位错改变为攀移到裂缝中去的“解理位错”。这种攀移意味着把塞积群中其余的位错推向源S的力减弱了;它们向着裂缝滑移,裂缝吸收它们并且长大。解理所解除的应力允许源S送出新的位错圈,它们随后被裂缝吸收,如图6b所示。因此晶体中位错排的存在,极有可能诱发亚表层裂纹的萌生,加重亚表层损伤。

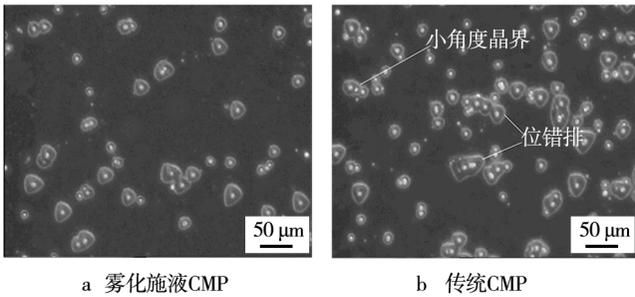


图5 不同抛光方式下硅片中心处的位错腐蚀形貌

Fig.5 Morphologies of dislocation etch pits in the middle of samples treated with different polishing methods: a) ultrasonic atomization CMP; b) traditional CMP

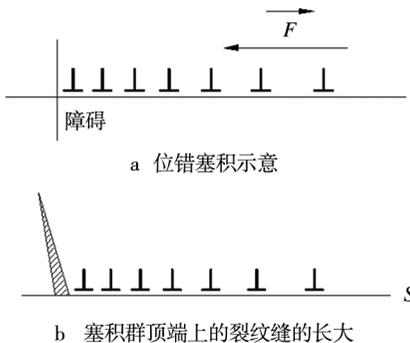


图6 滑移位错及其塞积

Fig.6 Dislocation glides and pileup: a) Dislocation pileup; b) The growth of crack on the top of pileup group

图7a和图7b为硅片边沿处的位错腐蚀形貌,相比较硅片中心处的位错腐蚀形貌,两种抛光方法下硅片的边沿处位错形貌显然要更好,腐蚀坑分布都很均匀和分散,密度明显小于中心处,无位错塞积等严重缺陷,此外在腐蚀的过程中也可以通过肉眼观察到边沿处的被腐蚀程度要小于其余部位,说明硅片边沿处的位错缺陷得到了更好的去除。

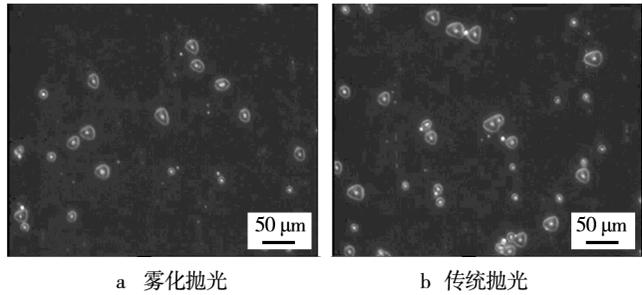


图7 不同抛光方式下硅片边沿处的位错腐蚀形貌

Fig.7 Morphologies of dislocation etch pits at the edge of samples treated with different polishing methods: a) Ultrasonic atomization CMP; b) Traditional CMP

雾化施液抛光后的硅片位错形貌好于传统抛光后的硅片,并且抛光液的消耗量大约为传统CMP的1/10。原因在于雾化施液特殊的施液方式,一方面在抛光过程中,磨粒与硅片表面的机械磨削作用会产生硅片中的内应力,使得硅晶体沿着一定的晶面(解理面)产生解理。由于解理不能一瞬间在很大的面积上发生,应该从一个初始的局部晶核出发,以裂缝的形式从一点扩散到另一点。解理区边上的裂缝边缘显然可以用位错来分析,这种解理位错在垂直于其Burgers矢量的解理面内作无扩散的“攀移”,同时由于裂缝两岸的移动是连续的,所以解理位错会连续地分布在裂缝两岸,晶体发生解理时引入的位错如图8所示。

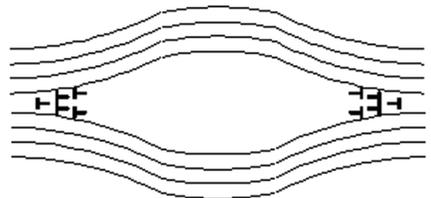


图8 解理引入的位错示意

Fig.8 Dislocations caused by cleavage

雾化的抛光液中液态水分子结构被打散成索太尔直径为5~15 μm的均匀微米级液粒,利用透射电镜扫描雾化抛光液得到的磨粒微观形貌如图

9所示,从图中可以看出磨粒排布整齐、分布均匀并且无团聚现象。在工件和抛光垫表面接触界面实现单磨粒磨削,避免了传统抛光液供液时磨料粒子团聚形成大磨粒加重硅片表面冲击的现象,一定程度上减轻了磨粒与硅片表面的接触应力,降低了晶面解理的可能性。因此雾化施液 CMP 过程在除去固有位错的同时,也一定程度上避免了新位错的萌生。另一方面高比表面积微米尺度的雾液化学活性强组分均匀,分散性好的磨粒被迅速地输送到抛光界面,同时抛光垫表面所附着的雾化抛光液极薄,并且两个磨粒划过硅片表面的时间间隔极短(10^{-8} s^[16]),因此硅片表面所形成的低剪切强度的氧化物薄膜厚度几乎为分子尺寸量级,磨粒对硅片表面材料的剥落属于分子量级的去除,不会造成宏观犁沟,对硅晶体晶格的破坏作用大大减轻,缓解了位错的萌生。从图5和图7的对比中可以发现,雾化抛光后的硅片表面位错分布均匀分散,位错成堆的现象很少。

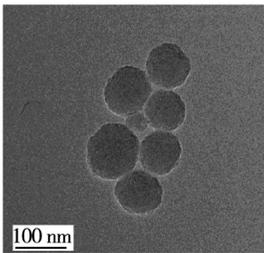


图9 磨料微观形貌及其分布情况的 TEM 照片

Fig. 9 TEM image of the abrasive microstructure and distribution

2.4 雾化参数对硅片位错的影响

雾化抛光的施液方式是将抛光液进行控频超声雾化形成均匀微米级雾粒,超声波雾化器的参数将直接影响到雾液的多少以及相关物理性质。在雾化施液 CMP 系统中,雾化器的功率由电压和电流控制,一方面通过改变功率的大小来调整抛光液的出雾量,另一方面雾化液粒径的大小也将受到功率的影响,随着功率的增大而逐渐减小^[17]。因此实验中通过调节电压来改变雾化器的功率,探讨在雾化抛光过程中雾化器功率对硅片表面的位错缺陷层去除规律,得到不同功率下硅片的位错密度以及腐蚀坑形貌。

从图10和图11可以发现,随着电压的增大,硅片表面各区域的位错密度呈现出不同程度的降低。在功率较小的时候,由于雾化液的供液量不充分,导致硅片表面位错缺陷层的去除不够,因此平均位错密度较大。此外,硅片边沿处的位错密度与其余区域相比较明显偏小,分析认为此时由于边缘处更大的抛光

压力提高了该区域的位错缺陷去除量。随着功率的继续增大,硅片表面各区域的位错密度呈现出了不同程度的降低,中心处的位错密度逐渐逼近平均位错密度。分析认为一方面大量的雾液弥散到抛光界面参与反应,提高了缺陷层的去除量;另一方面由于雾液的粒径减小,在抛光界面的分布更加均匀并且全面,使得硅片表面各区域的位错缺陷量逐渐一致。边沿处的位错密度虽然也呈现出降低趋势,但是幅度明显不如其他区域,原因是在较大的接触压力下,仅仅依靠提高雾化器的功率已不足以有效地去除位错缺陷层。结合图12硅片中心处的位错腐蚀形貌图还可以发现,当电压为35~45 V时,雾化液供量较小并且雾液粒径较大,观测到的位错蚀坑分布比较密集,部分位错蚀坑出现了重叠堆积的情况,并且蚀坑的大小不一,呈现出大、中、小3种形态,其中小蚀坑的三角形特性不明显。当电压继续增大至50~55 V时,从图12d和图12e中看出位错蚀坑的分布愈加分散,并且蚀坑堆叠的现象基本消失。这是由于充分的雾化抛光液在抛光界面强吸附、强活性和界面间高效能的均匀化学作用,并在磨粒的机械作用下足够均匀地去除位错损伤,同时雾液粒径的减小也有利于雾液在抛光

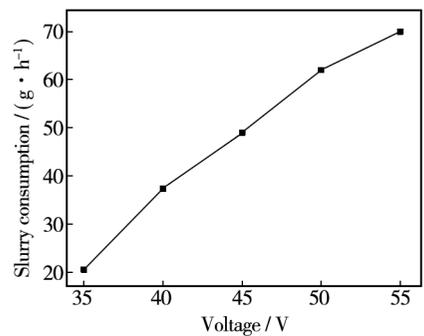


图10 不同电压下抛光液消耗量

Fig. 10 Polishing liquid consumption under different voltage

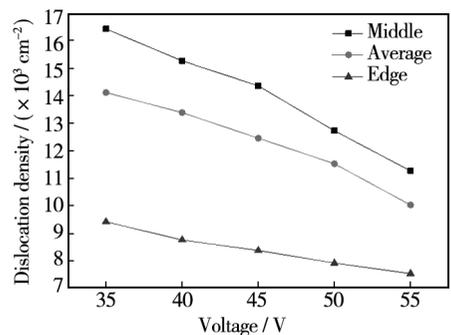


图11 不同电压下硅片各处的位错密度

Fig. 11 Dislocation density in different positions under different voltage

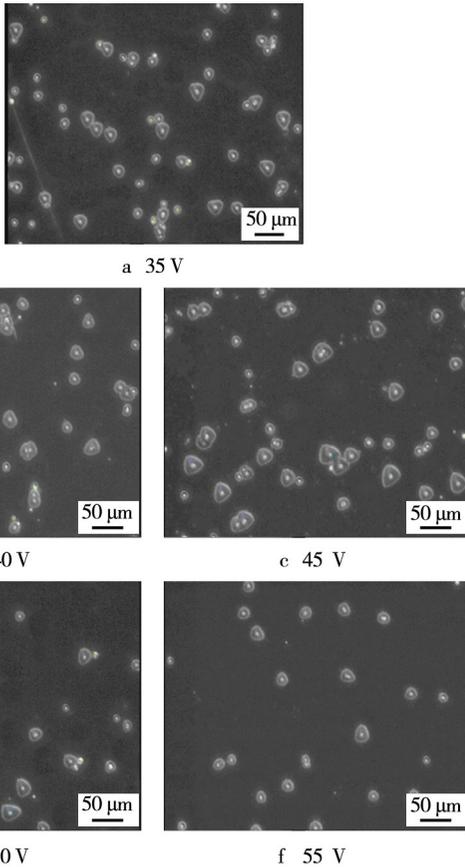


图12 不同电压下硅片的位错腐蚀形貌

Fig. 12 Morphologies of dislocation etch pits of silicon wafer under different voltage

界面的进一步均匀分散,并降低由于供液量增大诱发磨粒团聚现象的风险,减小抛光过程中对硅片表层的损伤。因此通过增大雾化器的功率,可以有效降低硅片表层的位错密度以及提高位错的分布质量。

3 结论

1) 雾化抛光硅片的位错密度平均值大约为 $1.2 \times 10^4 / \text{cm}^2$, 硅片边沿处的位错密度小于其他区域, 位错蚀坑分布比较均匀分散, 未出现位错排等严重损伤。

2) 和传统抛光相比, 雾化施液抛光通过消耗少量的抛光液而更好地去除了硅片表面的位错损伤层, 一方面经雾化的抛光液对位错缺陷的去除更加高效, 另一方面雾化抛光可以减轻对晶体晶格的损伤, 避免形成位错排等严重损伤。

3) 通过增加雾化器的出雾量, 可以有效降低位错的密度并且改善位错的分布情况, 不会出现因抛光液中磨料粒子团聚导致的硅片晶格严重损伤。

参考文献

- [1] 苏建修, 康仁科, 郭东明. 超大规模集成电路制造中硅片化学机械抛光技术分析[J]. 半导体技术, 2003, 28(10): 27—32.
SU Jian-xiu, KANG Ren-ke, GUO Dong-ming. Technology Analysis of Wafer Chemical Mechanical Polishing in the Manufacture of ULSI[J]. Semiconductor Technology, 2003, 28(10): 27—32.
- [2] 詹阳, 周国安. 化学机械抛光过程优化研究[J]. 电子工业专用设备, 2009(4): 37—39.
ZHAN Yang, ZHOU Guo-an. Study on Optimum Process of CMP[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2009(4): 37—39.
- [3] HORN M. Antireflection Layers and Planarization for Microlithography[J]. Solid State Technology, 1991, 34(11): 57—62.
- [4] RAHU J. Consumables for the Chemical Mechanical Polishing of Dielectrics and Conductors[J]. MRS, 1994, 337: 13—15.
- [5] 翟靖, 李庆忠. 一种使用超声波精细雾化施液的 SiO_2 抛光液[J]. 半导体技术, 2012, 37(4): 263—266.
ZHAI Jing, LI Qing-zhong. SiO_2 Slurry Delivered by Ultrasonic Fine Atomized Form[J]. Semiconductor Technology, 2012, 37(4): 263—266.
- [6] ANTONOV R D, JOHNSON A T. Subband Population in a Single-wall Carbon Nanotube Diode [J]. Applied Physics Letters, 1999, 83(16): 3274—3276.
- [7] 吕海涛, 张维连, 左燕, 等. 化学腐蚀法研究蓝宝石单晶中的位错缺陷[J]. 半导体技术, 2004, 29(4): 48—51.
LYU Hai-tao, ZHANG Wei-lian, ZUO Yan, et al. Study on the Dislocation of the Sapphire Crystal with Chemical Etching[J]. Semiconductor Technology, 2004, 29(4): 48—51.
- [8] 杨培志, 邓佩珍, 殷之文, 等. Yb:YAG 晶体的生长缺陷及位错走向[J]. 人工晶体学报, 2000, 29(4): 399—403.
YANG Pei-zhi, DENG Pei-zhen, YIN Zhi-wen, et al. Study on Growth Defects and Dislocation Propagation in Yb:YAG[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2000, 29(4): 399—403.
- [9] LU C W, JYH C C. Numerical Computation of Sapphire Crystal Growth using Heat Exchanger Method[J]. Crystal Growth, 2001(3): 274—281.
- [10] 王陈, 李庆忠, 朱欠, 等. 雾化施液 CMP 工艺及材料去除机制研究[J]. 润滑与密封, 2014, 39(2): 56—60.
WANG Chen, LI Qing-zhong, ZHU Bin, et al. Removal Mechanism and Processes in Atomized Slurry Applied CMP[J]. Lubrication Engineering, 2014, 39(2): 56—60.
- [11] 朱欠, 李庆忠, 王陈, 等. 雾化施液 CMP 工艺及实验设备

- [J]. 江南大学学报:自然科学版,2013,12(6):698—702.
- ZHU Bin, LI Qing-zhong, WANG Chen, et al. Study on the Process and Experimental Equipment of Atomizing Slurry Applied Chemical Mechanical Polishing [J]. Journal of Jiangnan University: Natural Science Edition, 2013, 12(6):698—702.
- [12] PEI Z J, BILLINGSLEY S R, MIURA S. Grinding Induced Subsurface Cracks in Silicon Wafers [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1999, 39(5):1103.
- [13] JIA Z Y, SU J X, Jin J Z, et al. Friction Characteristic of Wafer Surface in Chemical Mechanical Polishing [J]. Key Engineering Material, 2005(291/292):389—394.
- [14] 曾贵平, 曹余惠, 殷绍唐. 掺质 YAG 晶体中的缺陷 [J]. 人工晶体学报, 1999, 28(4):354—356.
- ZENG Gui-ping, CAO Yu-hui, YIN Shao-tang. Defects in Doped YAG Crystal [J]. Journal of Synthetic Crystals, 1999, 28(4):354—356.
- [15] 闵乃本. 晶体生长的物理基础 [M]. 上海:上海科技出版社, 1982.
- MIN Nai-ben. The Physical Foundation of Crystal Growth [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1982.
- [16] ZHAO Y W, CHANG L, KIM S H. A Mathematical Model for Chemical Mechanical Polishing Based on Formation and Removal of Weakly Bonded Molecular Species [J]. Wear, 2003, 254(7):332—339.
- [17] 黄卫星. 超声雾化试验研究 [D]. 镇江:江苏大学, 2007.
- HUANG Wei-xing. Experimental Study on Ultrasonic Atomization [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2007.
-
- (上接第 71 页)
- XIONG Tao. Research Progress in Electroless Ni-P-PTFE Composite Coatings [J]. Corrosion and Protection, 2010, 31(8):636—638.
- [8] 张会广. 双层 Ni-P 镀层及 Ni-P/PTFE 复合镀层的制备及性能研究 [D]. 成都:西南交通大学, 2010.
- ZHANG Hui-guang. Study of Preparation and Application of Duplex Ni-P Alloy Layer and Ni-P/PTFE Composite Layer [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [9] 杨俊涛. Ni-PTFE/Sn-Ni-PTFE 自润滑复合镀层的制备工艺和性能研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2013.
- YANG Jun-tao. Study on the Preparation Process and Performance of Ni-PTFE/Sn-Ni-PTFE Self-lubricating Composite Coating [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.
- [10] 唐宏科, 赵文轸. 表面活性剂对 Ni-Co-PTFE 复合电镀的影响 [J]. 宇航材料工艺, 2006(3):47—50.
- TANG Hong-ke, ZHAO Wen-zhen. Effect of Surfactants on Ni-Co-PTFE Composite Plating [J]. Aerospace Materials and Technology, 2006(3):47—50.
- [11] 李卫红. 自动电刷镀 Ni-PTFE 复合镀层特性及共沉积机制研究 [D]. 上海:上海交通大学, 2008.
- LI Wei-hong. Characteristic and Co-deposition Mechanism of Automatic Brush Electroplated Ni-PTFE Composite Coatings [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008.
- [12] SHRESTHA N K, SAKURADA K, MASUKO M, et al. Composite Coatings of Nickel and Ceramic Particles Prepared in Two Steps [J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 140(2):175—81.
- [13] 田海燕. 电泳-电沉积镍基纳米复合镀层及其性能的基础研究 [D]. 南京:南京航空航天大学, 2008.
- TIAN Hai-yan. Fundamental Research on the Manufacturing Technology and Properties of Ni-based Nano-composite Coatings by Electrophoretic-Electrochemical Deposition [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [14] 赵运伟, 黄巍, 田海燕, 等. 电泳-电沉积 Ni-金刚石复合镀层及其耐磨性能研究 [J]. 表面技术, 2013, 42(2):77—79.
- ZHAO Yun-wei, HUANG Wei, TIAN Hai-yan, et al. Research on the Ni-diamond Composite Coating by Electrophoretic-Electrochemical Deposition and Its Wear Resistance [J]. Surface Technology, 2013, 42(2):77—79.
- [15] HUANG W, ZHAO Y, WANG X. Preparing a High-particle-content Ni/Diamond Composite Coating with Strong Abrasive Ability [J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 235:489—494.
- [16] 付传起, 王宙, 何旭. Ni-P-PTFE 复合镀层工艺及摩擦学行为研究 [J]. 润滑与密封, 2011, 36(5):44—47.
- FU Chuan-qi, WANG Zhou, HE Xu. Research on Preparation Technology and Tribological Behaviors of Ni-P-PTFE Composite Coating [J]. Lubrication Engineering, 2011, 36(5):44—47.