

文章编号 1004-924X(2016)10-2490-08

纳米聚集氧化硅固定磨料抛光布的抛光特性

高 绮*

(天津职业大学 机电工程学院, 天津 300410)

摘要:针对传统磨料的固定磨料抛光布容易在加工表面产生划伤,以及材料去除效率低等问题,提出了采用微米级球形聚集氧化硅粒子的固定磨料抛光布。将纳米聚集氧化硅粒子添加到抛光布中,用 pH 为 10.5 的碱性水溶液替代传统的抛光液,进行了 Si 基板的抛光加工试验。与传统采用不规则形状天然氧化硅及球形熔融氧化硅固定磨料抛光布进行了比较,得到了纳米聚集氧化硅的固定磨料抛光布的加工特性,并讨论了它的基本参数对加工特性的影响。实验得到了与现行纳米抛光液(重量百分比为 3%, pH=10.5)相同的材料去除率,加工表面粗糙度降低了约 30%。与传统不规则形状天然氧化硅磨料抛光布相比,纳米聚集氧化硅抛光布的磨料为球形,弹性系数仅为其 1.4%~60%,因此不易划伤抛光表面。与熔融氧化硅抛光布相比,纳米聚集氧化硅抛光布在 pH 为 10.5 的碱性水溶液中磨料表面可吸附的 [—OH] 离子提高了 25 倍,使得液相化学去除作用增大至去除率的 70% 以上。另外,随着纳米聚集氧化硅的微米粒径的增大,固定磨料抛光布的纳米级加工表面粗糙度几乎不变,但对前加工面表面粗糙度的去除能力明显增大,表现出微米粒径效应。

关键词:固定磨料抛光布;纳米聚集氧化硅;化学去除材料;表面划伤;微米粒径效应

中图分类号: TN305.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162410.2490

Polishing characteristics of fixed-abrasive pad by using nano-aggregate silica

GAO Qi*

(School of Mechanical Engineering, Tianjin Vocational Institute, Tianjin 300410, China)

* Corresponding author, E-mail: qigao0330@sina.com

Abstract: A kind of fixed-abrasive pad by using nano-aggregate silica was proposed to overcome the shortcomings of the pads using conventional silica abrasives on its surface scratch and low removal efficiency. The nano-aggregate silica particles were added into the fixed-silica pad, and the polishing experiments of Si wafer were performed using this pad with D. I. water of pH=10.5 instead of conventional nanosilica polishing slurry. Several investigations were performed by comparing with fixed-silica pads using conventional irregular natural silica abrasive and spherical fused silica, the polishing performance the fixed-abrasive pad using nano-aggregate silica were obtained and some factors affecting the pad's polishing performance also were investigated. The material removal rate same as the exiting polishing nanosilica slurry (concentration 3wt%, pH=10.5) was obtained, and polished surface

收稿日期: 2016-04-10; 修订日期: 2016-05-27.

基金项目: 天津市自然科学基金资助项目(No. 13JCYBJC18100); 天津职业大学培育资助项目(No. 20101101)

roughness was decreased by about 1/3. Compared with the pad with fixed-conventional natural silica, the proposed fixed-aggregate silica pad is not easy to scratch Si wafer, because the nano-aggregate silica is not only a spherical shape but also has a elastic coefficient down to its 1.4%—60%. As compared with the pad with spherical fused silica, the proposed fixed-aggregate silica pad improves its adsorb $[-OH]$ ion by 25 times in D. I. water of pH=10.5, and allows the removal of material mainly came from chemical removing to be more than 70%. Moreover, nanoscale polished surface roughness is almost no changed with increasing the sizes of fixed-aggregate silica particles, but the polishing ability of pre-polishing surface roughness has been increased, which shows a micron particle size effect.

Key words: fixed-abrasive pad; nano-aggregate silica; chemical removal material; micro-scratch; micron particle size effect

1 引 言

固定磨料抛光布的硬度通常高于传统的不含磨料抛光布,在半导体的 CMP 工程中能改善氧化凹陷;此外由于其基材具有黏弹性,比其它固定磨料抛光工具(如砂轮)更容易实现无损伤镜面抛光加工^[1-4]。3M 公司的 Gagliardi^[5]为了使磨屑和脱落的磨料顺利排出,将固定磨料制成微米级的凸台或金字塔形的图案,为了保证微电子元件的平坦化,还将抛光布制成复合的夹层结构;Y. Kim^[6]采用低黏结度的基材,使固定在抛光布中的磨料在加工中自行脱落,以提高抛光效率,同时也试图解决因磨料难于脱落而造成的表面划伤问题。但与采用纳米抛光液的游离磨料加工相比,固定磨料抛光布的加工效率和加工表面质量都还不尽如人意,其中表面划伤(micro-scratch)问题是固定磨料抛光布在 CMP 中实用化的难点。传统的微米级磨料为了有效去除材料,通常采用不规则形状的硬质磨料,由粉碎法制成,机械去除作用为主。另一方面,现行的游离磨料抛光液所采用的纳米粒径的磨料,多用于固定磨料的涂布工具,添加到聚氨酯基材时添加率较低,仅 6%(体积分数),并且加工时磨料容易被埋入黏弹性基材中,难以发挥材料的去除作用^[7]。为此,作者提出了采用球形微米级粒径的纳米聚集氧化硅粒子作为固定磨料抛光布磨料的方案^[8]。纳米聚集氧化硅粒子通常用于微电子行业和化工行业。金澤孝明和榎本俊之^[9]率先将其应用于 Si 基板边缘加工的研磨带,进行干式精密研磨加工。Peng liu^[10]等制备了结构类似的多孔氧化硅,用于硬盘的抛光。但目前为止,对纳米结构氧化硅

的加工机理的研究还不多见。

在前期报告中主要研究了在游离磨料条件下,微米级球形纳米聚集氧化硅粒子单体所特有的抛光特性^[7],本文在此基础上进一步研究了纳米聚集氧化硅的固定磨料抛光布的加工特性。将纳米聚集氧化硅抛光布与形状、结构及表面特性各异的天然氧化硅及熔融氧化硅磨料抛光布进行比较;试验分析多种固定磨料抛光布与 pH10.5 碱性水溶液并用时的 Si 基板的加工特性;最后对纳米聚集氧化硅固定磨料抛光布的氧化硅粒径,添加率,气孔率等参数的影响进行了试验分析。

2 氧化硅固定磨料抛光布的制备

实验采用与 IC1000 抛光布材料相近的聚氨酯材料为抛光布基材,氧化硅固定磨料抛光布的制备工艺以树脂的硬化工艺为基础,主要有预热、混合、脱泡、硬化等步骤。由于聚氨酯的预聚体的 Isocyanate 表面富有活性,易于吸收空气中的水分,生成 CO₂ 气体,须经过脱泡工序。再加上固定磨料抛光布在添加磨料并混合搅拌时易于混入空气,要进行二次脱泡工艺。为了对比不同氧化硅磨料制备抛光布时填充特性,首先选取传统的不规则形状的天然结晶氧化硅磨料(平均粒径为 3.5 μm,日本 Fujimi Inc.)作为对比基准,其次选取与之结构相近的球形熔融氧化硅(平均粒径为 3.2 μm,日本 Admatechs Ltd.)。在选择树脂基材的硬度时,先后试验了邵氏硬度 30D,66D,74D 的 3 种聚氨酯(日本三井武田化学株式会社制)。其中基材硬度为 30D 的抛光布,由于基材的黏弹性过大,氧化硅磨料几乎丧失了材料去除能力,不适合用于固定磨料抛光布。硬度为 66D,74D 的

聚氨酯基材中,选取了材料去除率较高,加工平坦度较好的 74D 聚氨酯作为氧化硅固定磨料抛光布的基材。

由于天然氧化硅为粉碎法制成的不规则形状,粉体的压缩度和安息角较大,而熔融氧化硅的球形化的形状指数较高,粉体的流动性得到改善,氧化硅固定磨料抛光布的填充率可提高至 60% (体积分数),抛光布的硬度可提高至橡胶硬度 99。事实上球形熔融氧化硅通常被用作树脂的填充材料。本文的纳米聚集结构氧化硅(平均粒径约 $4\ \mu\text{m}$, 日本 JGC C & C),虽然与熔融氧化硅同为球形粒子,但是由 $10\sim 20\ \text{nm}$ 的子粒子聚集而成(图 1 左上角),富含纳米孔结构,其粒子的比表面积高出 80 倍以上^[7],表面活性较高,易于吸附空气和水分,因此抛光布制备时,脱泡工艺更加重要。主要采用比表面积较低的纳米聚集氧化硅 A 系列。图 1 所示为纳米聚集氧化硅的固定磨料抛光布的表面 SEM 照片。

固定磨料抛光布使用前的表面加工处理,采用精密单面研磨机 SPL-15PL(日本 OKUMA CORPORATION)的表面车削装置,用金刚石刀片(日本旭金刚石制, 90° ,刀尖角为 $0.5\ \text{mm}$)进行平整度和表面粗糙度的切削加工。分别以 $99\ \text{mm}/\text{min}$, $10\ \text{mm}/\text{min}$, $1\ \text{mm}/\text{min}$ 的 3 种刀具进给速度,和 $400\ \text{rpm}$ 的工作台转速,加工出“粗”、“细”、“精细”的 3 种抛光布的表面进行加工性能对比。综合考虑固定磨料抛光布的材料去除性能和表面切削的加工效率,选取采用“细”切削的表面加工处理。

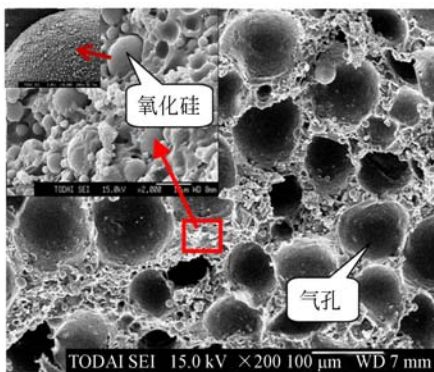


图 1 纳米聚集氧化硅固定磨料抛光布的表面 SEM 照片

Fig. 1 SEM picture of fixed-abrasive pad using nano-aggregated silica

3 含有纳米聚集氧化硅磨料抛光布的镜面加工特性

首先,将传统的不规则形状天然氧化硅与球形熔融氧化硅进行比较,二者皆为不含孔隙的实体结构,比表面积几乎相同^[7],分别制成气孔率为 26% (体积分数),磨料添加率为 25% (体积分数)的氧化硅的固定磨料抛光布,为了便于与纳米氧化硅抛光液的游离磨料相比较,将 KOH 添加到去离子水中,调成 pH 约为 10.5 的碱性水溶液作为抛光液,用精密单面研磨机 SPL-15,在表 1 的加工条件下,对半导体 Si 基板进行加工。材料去除率由加工前后重量的差来计算,被加工工件的表面粗糙度由 Nanostep2 (英国 Taylor Hobson Ltd.)超精密表面轮廓仪测量。

表 1 抛光加工条件

Tab. 1 Polishing conditions

工件	3" Si 片
前加工面的表面粗糙度	$0.27\ \mu\text{mRa}$, $2\ \mu\text{mRz}$
抛光压强 P/kPa	20 kPa
转速(工作台, 工件) n/rpm	60 rpm
抛光时间 t/min	15 min

天然氧化硅的固定磨料抛光布(图 2 左上),由于磨料具有坚硬锐利的切削刃(图 2 左上的左上角),去除材料的同时也容易在 Si 基板表面产生具有方向性的划痕(图 2 右上)。与之相比,熔融氧化硅的球形形状和粒子光滑的表面(图 2 左下的左上角),较易于避免划痕(图 2 右下)。前期的游离磨料的加工结果表明,球形的熔融氧化硅粒子在 20 kPa 的加工压力下,粒子容易在抛光布上打滑,不能正常进行材料去除^[7];但被固定到聚氨酯基材后,在同样的压力下熔融氧化硅能够正常地进行材料去除。但材料去除率较低,不能满足使用要求。

为此比较了同样是球形、平均粒径为 $4\ \mu\text{m}$ 的纳米聚集结构的氧化硅粒子的固定磨料抛光布。其对 Si 基板的加工的示意如图 3 所示。试验结果如图 4 所示。可以看出两种抛光布的硬度基本相同。与熔融氧化硅相比,纳米聚集氧化硅

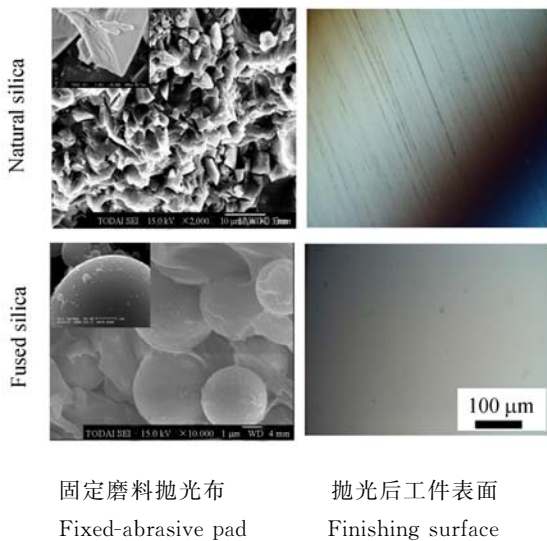


图 2 天然氧化硅抛光布与熔融氧化硅抛光布的比较
Fig. 2 Comparison of fixed silica pad using fused silica and natural silica

的抛光布不仅材料去除率较高,加工表面粗糙度也较好。对比加工中工作台的驱动电机所消耗的电流,如图 5 所示,观察到熔融氧化硅抛光布的消耗电流,初期呈现平稳状态,经过数分钟后,被加工表面趋于平滑时,电流发生明显的大幅度周期性变化,其变化幅度约为纳米聚集结构氧化硅抛光布电流曲线的 2 倍。由于加工中消耗的电与加工中的摩擦载荷或摩擦系数成正比,可以推断上述现象是由于熔融氧化硅粒子的表面过于光滑,与被加工 Si 基板表面之间不足以形成稳定的摩擦去除作用造成的。而从图 1 左上角的 SEM 照片可以看出,纳米聚集氧化硅表面的纳米子粒子不仅可以参与材料去除,还形成了均匀的纳米级凹凸表面,与抛光加工的工件表面之间保持了稳定的摩擦去除状态。

为了进一步研究纳米聚集结构氧化硅抛光布的去理机理,以纯水作为抛光液进行了加工对比。此时熔融氧化硅的固定磨料抛光布的材料去除率是纳米聚集氧化硅抛光布的 2 倍左右(图 4),这主要是由于纳米聚集结构氧化硅含有均匀的纳米介孔(细孔容积 $0.1 \text{ cm}^2/\text{g}$),机械去除作用较小。然而当采用碱性水溶液(pH10.5)时,纳米聚集结构氧化硅的抛光布的材料去除率提高了 2 倍以上,超过了熔融氧化硅的抛光布的去理率。为了分析原因,将等量的两种氧化硅磨料分别投入 pH10.5 的碱性水溶液中搅拌并观察 pH 值的

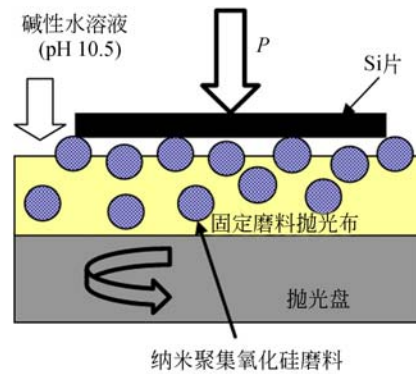


图 3 固定磨料抛光布加工 Si 片示意图
Fig. 3 Schematic diagram of Si wafer polishing with fixed-abrasive pad

变化,由此计算出氧化硅表面所吸附的[OH]离子的摩尔浓度。试验发现纳米聚集氧化硅由于表面活性(Sa)较高,所吸附的[OH]离子的量提高 25 倍以上,如图 4 所示,因此纳米聚集氧化硅抛光布具有较强的液相化学去除作用^[11]。采用 pH10.5 碱性水溶液时的去除率与中性去离子水时的去除率的差值,即为氧化硅在碱性条件下的液相化学去除作用所产生的去除率,约占总去除率的 70% (PCR) 以上。若采用表面活性更高的 C 粒子,液相化学去除作用有望进一步提高。这显然不同于通常结构的微米级氧化硅磨料的材料去除特性。

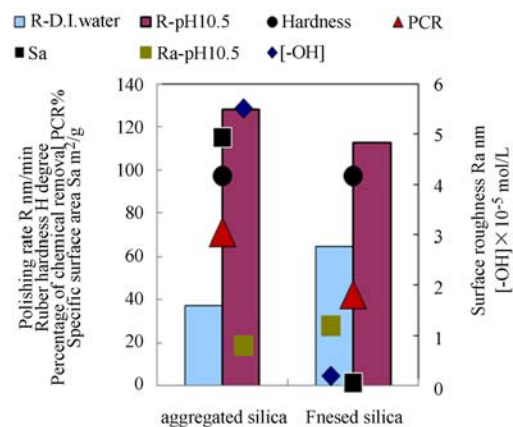


图 4 氧化硅固定磨料抛光布加工性能的比较
Fig. 4 Comparison of fixed-aggregate silica pad and fixed-fused silica pad

此外,比较了氧化硅粒子的压缩弹性系数。与传统的天然氧化硅的 $88 \text{ N}/\mu\text{m}$ 相比,纳米聚集

氧化硅 A 的弹性系数 $52 \text{ N}/\mu\text{m}$, 约为天然氧化硅的 60% , 而纳米聚集氧化硅 C 的弹性系数为 $1.24 \text{ N}/\mu\text{m}$, 仅为 1.4% 左右^[7], 这使得纳米聚集氧化硅抛光布不易产生表面划伤。

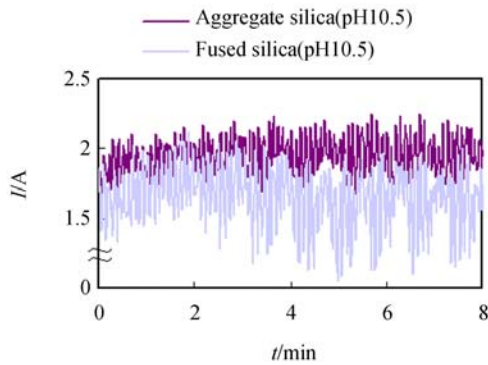


图 5 纳米聚集氧化硅与熔融氧化硅抛光布在抛光中消耗电流的比较

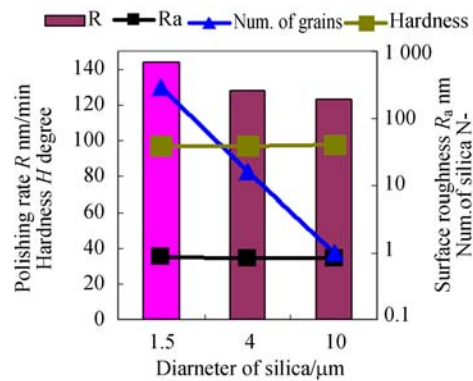
Fig. 5 Comparison of motor currents during polishing by the pads of aggregate silica and fused silica

4 纳米聚集氧化硅固定磨料抛光布的基本参数的影响

4.1 磨料粒径的影响

选用平均粒径分别为 $1.5 \mu\text{m}$, $4 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$ 的 3 种纳米聚集氧化硅 A 磨料, 分别自制成磨料添加率约为 25% (体积分数), 气孔率约 26% (体积分数) 的固定磨料抛光布。采用同样的加工条件对 Si 基板进行抛光特性的对比。试验发现, 平均粒径为 $1.5 \mu\text{m}$ 的纳米聚集氧化硅的固定磨料抛光布, 当 Si 基板前加工面的表面粗糙度为 $2 \mu\text{m}R_a$ 时, 材料去除率极低, 但当前加工面的表面粗糙度降为 $0.7 \mu\text{m}R_a$ 时, 材料去除恢复正常, 如图 6 所示。这表明纳米聚集结构氧化硅抛光布, 有可能通过适当加大氧化硅的微米级粒径, 直接加工较粗的前加工表面; 由图 6、图 7 可见, 尽管固定磨料抛光布的磨料粒径由 $1.5 \mu\text{m}$ 增大到 $10 \mu\text{m}$, 但加工的表面粗糙度基本稳定在约 $0.8 \text{ nm}R_a$ 左右。这样有望减小 Si 基板抛光加工工艺步骤的数目, 提高整体的抛光加工效率。

从图 6 的试验结果还观察到, 随着磨料粒径的增大, 抛光布的材料去除率却在降低。这是因为



磨料添加率: 约 26% (体积分数) 气孔率: 约 25%
Silica rate : about $26\text{vol}\%$ Porosity rate: about $25\text{vol}\%$
图 6 磨料粒径对纳米聚集氧化硅抛光布抛光性能的影响
Fig. 6 Effect of aggregate silica diameter into pad on polishing performance

为在磨料添加率相同的条件下, 随着磨料粒径的增大, 磨料个数在逐渐减少。所以图 6 是磨料粒径与磨料个数的综合作用的结果。为了使各抛光布的磨料个数大致相同, 将 3 种粒径的氧化硅磨料的添加率分别调整为 0.1% (体积分数), 4% (体积分数), 25% (体积分数)。图 7 的试验结果表明, 纳米聚集氧化硅磨料的粒径越大, 材料去除率越高。这是因为磨料粒径越大表面的纳米粒子越不容易被埋入抛光布中, 参与材料去除的纳米粒子越多, 越容易发挥材料去除作用; 同时与抛光布的有效摩擦损耗越小, 工作台所消耗的电流量越小即微米粒径效应, 如图 8 所示。

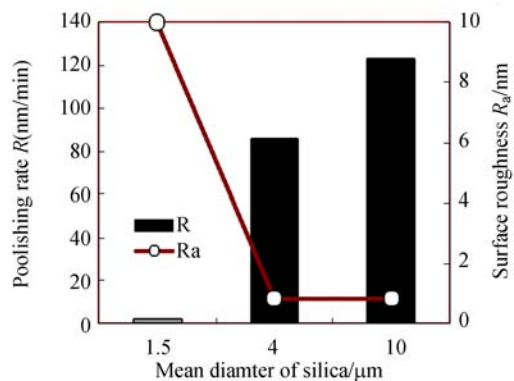


图 7 磨料粒径对纳米聚集氧化硅抛光布抛光性能的影响(磨料个数大致相同)

Fig. 7 Effect of aggregate silica diameter into pad on polishing performance (same silica number)

纳米聚集磨料与传统磨料不同, 抛光加工的

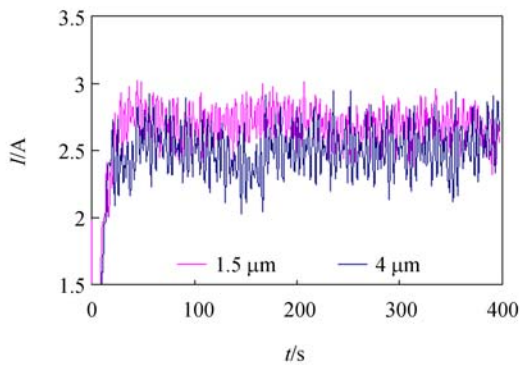


图 8 抛光布的磨料粒径与消耗电流 (磨料数相同)
Fig. 8 Comparison of motor currents (same silica number)

纳米级表面粗糙度几乎不随磨料的微米级粒径改变。这是由于以液相化学去除为主。

4.2 磨料添加率的影响

纳米聚集氧化硅的固定磨料抛光布的磨料添加率越高, 氧化硅磨料与聚氨酯的预聚体相混合时黏度越大, 越容易凝胶 (gel) 化, 抛光布制作会变得困难。为此, 本实验采用平均粒径 $4 \mu\text{m}$ 的纳米聚集氧化硅, 自制了磨料添加率在 50% (体积分数) 以下的 4 种固定磨料抛光布, 气孔率统一为约 26% (体积分数)。试验结果如图 9 所示。随着磨料添加率的增大, 不仅抛光布单位面积内磨料个数增多, 而且抛光布的硬度逐渐增大, 因此抛光布的材料去除率逐渐提高。同时, 由于磨料密度的增大, 有效作用磨料个数增多, 抛光表面粗糙度数值呈减小的趋势。

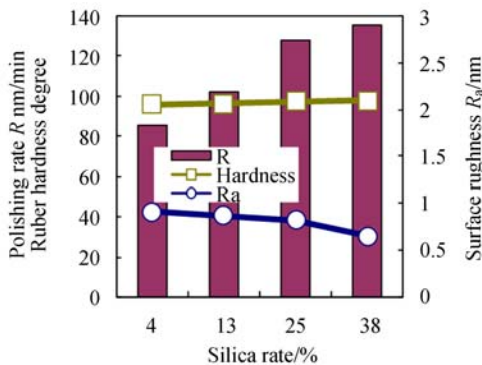


图 9 磨料添加率对抛光布抛光性能的影响
Fig. 9 Effect of silica rate on polishing performance of fixed-silica pad

4.3 气孔率的影响

制备了气孔率分别约为 21% (体积分数),

26% (体积分数), 35% (体积分数) 的 3 种纳米聚集氧化硅的抛光布。其中抛光布的独立气孔直径约为 $100 \mu\text{m}$ 左右, 氧化硅磨料的添加率统一为约 25% (体积分数)。抛光特性如图 10 所示, 随着抛光布气孔率的逐渐提高, 被加工的 Si 基板与抛光布的接触面积逐渐减小, 使得单位面积承受的抛光压力增大, 同时随着气孔率的提高, 抛光布气孔中含有的碱性抛光液也逐渐增多, 这都使纳米聚集氧化硅磨料的液相化学去除作用更有效, 使得氧化硅抛光布的材料去除率逐渐提高, 加工表面粗糙度值逐渐变小。

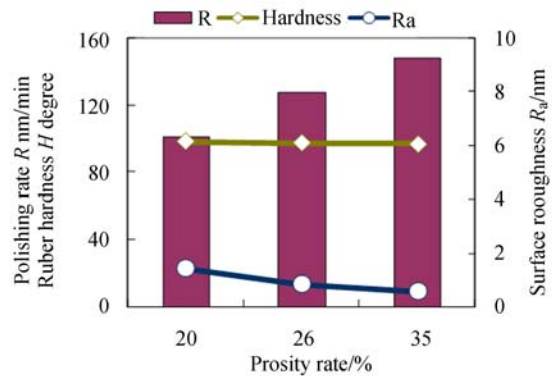


图 10 气孔率对抛光布抛光性能的影响
Fig. 10 Effect of porosity rate on polishing performance of fixed-silica pad

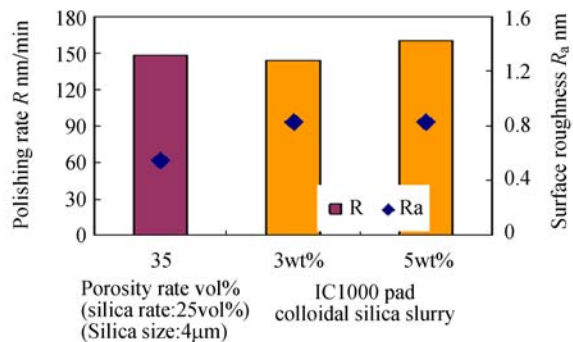


图 11 固定磨料抛光布与现行游离磨料加工的比较
Fig. 11 Comparison of fixed-silica pad and conventional polishing with nano silica slurry

综合以上的结果, 采用平均粒径约为 $4 \mu\text{m}$ 的纳米聚集氧化硅的固定磨料抛光布, 当磨料添加率 25% (体积分数), 气孔率 35% (体积分数) 时, 抛光性能最佳。与采用 IC1000 抛光布和纳米氧化硅抛光液 (ST-20, 日本日产化学株式会社

制, pH10.5)的游离磨料加工相比,本固定磨料抛光布的加工表面粗糙度值可以减小约 30%,材料去除率与抛光液浓度 3wt%的水平相近,但比 5wt%的水平要低(图 11)。

5 结 论

本文针对传统磨料的固定磨料抛光布容易在加工表面产生划伤,加工性能难以满足要求,以及纳米级氧化硅磨料难以添加到聚氨酯树脂和材料去除效率低等问题,提出采用微米级球形的纳米聚集氧化硅粒子的固定磨料抛光布,对半导体 Si 基板进行了加工特性的试验对比研究。得出以下结论:与传统的不规则形状天然氧化硅抛光布相比,粒径相近的球形纳米聚集结构氧化硅由于磨

料具有球形形状,并且磨料的弹性系数仅为其 1.4%~60%左右,因此固定磨料抛光布不易产生被加工表面的划伤。与粒径相近的熔融氧化硅抛光布相比,同样为球形的纳米聚集氧化硅抛光布,在 pH 约 10.5 的碱性水溶液的抛光液中,由于磨料表面吸附的 $[-OH]$ 量高出约 25 倍以上,材料去除呈现较强的液相化学去除作用,占总去除率的 70%以上。此外,纳米聚集结构形成的纳米凸凹表面,改善了熔融氧化硅粒子在抛光加工中的摩擦去除状态,既提高了固定磨料抛光布的材料去除率,又减低了加工表面粗糙度值。与传统氧化硅磨料不同,采用纳米聚集氧化硅的固定磨料抛光布,随着磨料粒径的增大,所加工的纳米级的表面粗糙度几乎不变;而对前加工面的表面粗糙度的加工能力显著提高。

参考文献:

- [1] DINESH CHOPRA. Copper chemical-mechanical polishing process using a fixed abrasive polishing pad and a copper Layer chemical-mechanical polishing solution specifically adapted for chemical-mechanical polishing with a fixed Abrasive pad[P]. USA: patent disclosure, US6276996B1 2001.
- [2] YAGUO LI, YONGBO WU, LIBOZHOU, MASAKAZU FUJIMOTO. Vibration-assisted dry polishing of fused silica using a fixed-abrasive polisher [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2014, 77 :93-102.
- [3] ZHI CH D, HAO B CH, HON Y T. Further investigations on fixed abrasive diamond Pellets used for diminishing mid-spatial frequency errors of optical mirrors [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(3):327-334.
- [4] YUSUKE KOKUBU, YASUHIRO TANI, *et al.*. Novel non-woven polishing pad impregnated with epoxy resin [C]. *The 15th International Conference on Precision Engineering*, 2014:752-753.
- [5] JOHN G. Fixed abrasives and selective chemistries: some real advantages for direct STI CMP [C]. *Proceedings of CMP-MIC conference*, 2002:101.
- [6] KIM Y, PARK J H, KIM H J, *et al.*. Self-conditioning of encapsulated abrasive pad in chemical polishing [C]. *Proceedings of CMP-MIC Conference*, 2002:395-402.
- [7] GAO Q, TANI Y, DONG G. Polishing characteristics of micron particles aggregated by nanosilica [J]. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 2015, 9 (3): *Jamdsm0027*.
- [8] 高崎,谷泰弘. シリカ入り研磨パッドの開発 [C]. 2001 年度精密工学会秋季大会講演会講演論文集, 2001:406.
GAO Q, TANI Y. Development of fixed silica pad [C]. *Proceedings of the Japan Society for Precision Engineering, Autumn*, 2001:406. (in Japanese)
- [9] 榎本俊之, 金澤孝明等. 超微細シリカ凝集砥粒を用いた研磨フィルムによるシリコンウェーハのエッジ仕上げ - 高生産性研磨フィルムの開発 - [J]. *砥粒加工学会誌*, 2002, 46(9):458-463.
TOSHIYUKI E, TAKA AKI K, *et al.*. Edge finishing of a silicon wafer with a lapping film utilizing agglomerative superfine silica abrasives-Development of a lapping film with high finishing efficiency [J]. *Journal of the Japan Society for Abrasive Technology*, 2002, 46(9):458-463. (in Japanese)

- [10] PING L, HONG L, RULING C, Polishing properties of porous silica abrasive on hard disk substrate CMP [J]. *International Journal abrasive technology*, 2010, 3(3):228-237.
- [11] ERIC M, Polishing of silicon [J]. *SCP and Solid State Technology*, 1967, 8:27-39.

作者简介:



高 绮,女,辽宁沈阳人,副教授,1987年于天津大学获得硕士学位,主要从事微电子产品的抛光磨料及抛光工具方面的研究。E-mail: qigao0330@sina.com

(版权所有 未经许可 不得转载)