

精密与超精密加工

导体镶嵌型巨电流变抛光液
及其对硅材料的抛光邱昭晖^{1a}, 江波^{1b}, 陆坤权², 沈容², 熊小敏^{1a}(1. 中山大学 a. 物理学院 b. 电子与信息工程学院, 广州 510275;
2. 中国科学院物理研究所, 北京 100080)

摘要: **目的** 解决现有电流变抛光液在电场下强度低和使用寿命短等问题。**方法** 分析现有电流变抛光液的缺点及其原因, 提出将新型巨电流变液——导体镶嵌型电流变液应用于抛光领域, 并研制出以二氧化硅为磨料, 以镶嵌了纳米碳的二氧化钛为电介质颗粒的硅油基电流变抛光液。测定添加了不同粒径磨料抛光液的剪切强度与电场强度、温度、使用时间的关系。搭建简易的旋转式电流变抛光装置, 对不同粒径磨料的电流变抛光液在硅片表面的抛光效果进行试验。**结果** 碳镶嵌二氧化钛基电流变抛光液具有高剪切强度 (>30 kPa)、低漏电流 ($<1 \mu\text{A}$)、高温稳定性 ($25\sim 125^\circ\text{C}$)、长使用寿命和对少量磨料不敏感等优点。抛光实验结果表明, 在电压 2.5 kV 下, 硅片经过添加了 $2\text{ }\mu\text{m}$ 磨料的电流变抛光液持续抛光 3 h 后, 其表面粗糙度从 206 nm 降至 6.4 nm 。之后再采用添加 200 nm 磨料和 20 nm 磨料的抛光液先后继续精抛后, 其粗糙度降至 0.46 nm 和 0.36 nm 。**结论** 碳镶嵌二氧化钛基巨电流变抛光液能有效降低表面粗糙度, 改善表面质量, 很好地应用于精密抛光领域, 展示出良好的应用前景。

关键词: 导体镶嵌型电流变液; 剪切强度; 电流变抛光; 硅片; 表面粗糙度

中图分类号: TG580.692 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)05-0218-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.05.021

Nano-conductor Dominated Giant Electrorheological Polishing
Fluid and Its Application to Silicon MaterialsQIU Zhao-hui^{1a}, JIANG Bo^{1b}, LU Kun-quan², SHEN Rong², XIONG Xiao-min^{1a}(1. School of Physics, b. School of Electronics and Information Technology, Sun Yat-sen
University, Guangzhou 510275, China; 2. Institute of Physics, Chinese Academy of
Sciences, Beijing 100080, China)

ABSTRACT: The work aims to overcome the limitations of low intensity and short lifetime of existing electroheological (ER)

收稿日期: 2022-05-27; 修订日期: 2022-12-22

Received: 2022-05-27; **Revised:** 2022-12-22

基金项目: 国家自然科学基金 (11874430)

Fund: National Natural Science Foundation of China (11874430)

作者简介: 邱昭晖 (1995—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电流变材料及其应用。

Biography: QIU Zhao-hui (1995-), Male, Doctoral candidate, Research focus: electrorheological material and its applications.

通讯作者: 熊小敏 (1970—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为软物质功能材料。

Corresponding author: XIONG Xiao-min (1970-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: soft functional materials.

引文格式: 邱昭晖, 江波, 陆坤权, 等. 导体镶嵌型巨电流变抛光液及其对硅材料的抛光[J]. 表面技术, 2023, 52(5): 218-225.

QIU Zhao-hui, JIANG Bo, LU Kun-quan, et al. Nano-conductor Dominated Giant Electrorheological Polishing Fluid and Its Application to Silicon Materials[J]. Surface Technology, 2023, 52(5): 218-225.

polishing fluid under the electric field. The defects of the existing ER polishing fluid were analyzed to remedy them by putting forward the idea of applying a novel giant ER fluid based on dielectric particles inlaid with conductor clusters to the polishing field. The novel giant ER fluid consisted of dielectric particles inlaid with nano-conductor clusters and isolating oil, the effect of which was the result of the strong interaction generated by the conductor nanoclusters in the process of inducing dipole moments in the electric field. Due to the stable combination of dielectric particles and conductor nanoclusters, the fluid could withstand the long-lasting friction and temperature changes. Therefore, its advantages of larger shear strength and long lifetime, made it suitable for being an ER polishing fluid. This research developed a silicon-oil based ER polishing fluid using TiO_2 inlaid with nano-carbon as dielectric particles and SiO_2 as abrasive. The basic principle of the ER polishing was that the ER particles in the fluid formed a chain or column structure under the influence of electric field, enveloping abrasive particles and becoming a flexible polishing head. When the head moved, the abrasive exerted a micro cutting effect on the surface of workpiece so as to achieve the purpose of polishing. During the study, the dissertation determined the relationships between the shear strength of polishing fluid added with abrasives of different particle sizes (2 μm , 200 nm, 20 nm) and electric field that was under different strength and temperatures. A simple rotary electrostatic polishing device was set up to carry out trials on the polishing effect of ER fluids with abrasives of different particle sizes. The electrodes were made up of two paralleled copper sheets which were 3 mm thick and 10 mm in both length and width. The gap between the electrodes was 1 mm wide. By applying a high voltage on the copper sheets, the shear strength of ER polishing fluid which was between and at the top of the copper sheets increased and would form a flexible polishing head. When the tool rotated, the head performed the polishing work on the workpiece. During the polishing process, the gap between the copper electrode and workpiece was 0.3 mm in width and the voltage between electrodes was 2.5 kV. The study showed that the newly developed ER polishing fluid had advantages such as high shear strength (>30 kPa), small leakage current (<1 μA), stability under high temperature (25-125 $^{\circ}\text{C}$), a long service life and insensitivity to small amounts of abrasives. The polishing experiment result revealed that the roughness of the silicon wafer dropped from 206 nm to 6.4 nm after being ground by the ER polishing fluid added with a 2 μm abrasive. The roughness of the silicon wafer then dropped to 0.46 nm after being polished by the fluid with a 200 nm abrasive while the roughness dropped to 0.36 nm after being polished by the fluid with a 20 nm abrasive. It is shown in this thesis that the new novel giant ER fluid can effectively reduce the surface thickness, improve the surface quality, and can be well applied to precision polishing, showing a good application prospect.

KEY WORDS: nano-conductor dominated electrorheological fluid; shear strength; electrorheological polishing; silicon wafer; surface roughness

随着对微纳器件需求的增加,器件的精密复杂程度也越来越高,人们对器件表面加工质量(如表面粗糙度、面型精度等)提出了更高的要求^[1-2]。在抛光复杂曲面时,传统方法(如小磨头抛光、应力盘抛光等)面临着抛光盘与工件表面难以完全贴合的问题,很难得到高质量表面。然而,电/磁流变效应形成的柔性抛光头可以很好地贴合复杂表面,能解决传统抛光方法遇到的问题^[3-5]。

针对磁流变抛光的研究经过了近 30 年的发展,取得了丰硕的成果,已成功对大口径平面光学元件进行磁流变加工^[6-7],相较于磁流变抛光,电流变抛光具有电场易建立,抛光头小且形状多样,设备简单,功率低等优点^[8-9]。Kuriyagawa 等^[10]首先提出将电流变技术应用于抛光领域,将抛光粉混入电流变液(屈服强度约为 1 kPa)后,利用锥形电极成功将光学玻璃的粗糙度从 18.6 nm 降至 2.8 nm。Kim 等^[11]观察了淀粉-硅油基电流变抛光液在电场下的成链情况,并对玻璃进行了电流变加工,使玻璃的粗糙度从 28 nm

降至 2.8 nm。Su 等^[12]采用轮式抛光工具,以及由淀粉、硅油和 CeO_2 制成的抛光液(屈服强度约为 2 kPa),将玻璃被抛光区域的表面粗糙度降至 0.86 nm。Zhao 等^[13]利用淀粉、硅油和金刚石颗粒混合而成的电流变抛光液,研究了针状电极对导体材料的去除。田硕^[14]首次将极性分子型巨电流变液(由尿素包覆的 Ba-Ti-O 颗粒组成,剪切强度约为 15 kPa)应用于抛光领域,利用集成环状电极抛光工具对光学玻璃进行电流变抛光。以前研究者们使用的电流变液材料存在剪切强度较低^[15]或者使用寿命短^[16]等问题,导致电流变抛光比磁流变抛光的效率低,抛光效果不明显,因此其工业化应用严重落后于磁流变抛光^[17]。

最近提出了新一代的巨电流变液—导体镶嵌型电流变液,它具有高剪切强度、长寿命、高温稳定性、低漏电流等优点^[18],能有效满足电流变抛光对电流变液的要求。文中提出将导体镶嵌型电流变液应用于抛光领域,研究导体镶嵌型电流变液制备的电流变抛光液的基本性质;比较不同粒径磨料对抛光液的剪

切强度、漏电流、温度稳定性和寿命的影响；搭建简易的电流变抛光装置。用上述抛光液对硅片进行电流变抛光，其原子力显微镜和光学显微镜检测结果表明，基于导体镶嵌型电流变液的抛光液具有很好的抛光效果。

1 电流变液及电流变抛光技术

1.1 电流变液的发展与新型电流变抛光液

电流变液 (Electrorheological fluid, ERF) 是由电介质颗粒和绝缘油组成的悬浮液。在电场作用下，电介质颗粒相互吸引成链，剪切强度迅速增大，其变化连续可控。当撤去电场后，电流变液又能迅速恢复为流体状态^[18-20]。电流变抛光液 (Electrorheological polishing fluid, ERPF) 是在电流变液的基础上加入磨料颗粒 (如二氧化硅、氧化铝、氧化铈等) 制得的^[8-14]。

电流变液分为传统电流变液和巨电流变液^[16]。其中，传统电流变液又可分为含水型电流变液 (如最常用的电流变抛光液：淀粉-硅油体系^[8,11-13]) 和介电型电流变液 (如图 1a 所示)。传统电流变液的屈服强度较低^[20]，其抛光效果不如磁流变抛光的抛光效果^[17]。巨电流变液一般都为极性分子型 (如图 1b 所示)，虽然它的屈服强度很高，但是因吸附在电介质颗粒表面的极性分子在摩擦或者高温下会发生脱落、挥发、分解等，极性分子型巨电流变液的剪切强度在使用过程中会出现下降幅度增大的现象^[21]，而且随温度的变化较大^[22]，因此很难实际应用于抛光领域。

为了解决无法兼顾电流变液材料的剪切强度和寿命的问题，提出了导体镶嵌型电流变液 (如图 1c 所示)。这种电流变液是将金属微团或碳 (半金属) 微团镶嵌在介电颗粒 (如 TiO_2 颗粒) 中，由这种颗粒与绝缘油 (如硅油) 混合制备而成。这是一类新型巨电流变液，其电流变效应源于镶嵌的导体微团在电场中诱导偶极矩的强相互作用，异于以前的极性分子型巨电流变液。在电场强度为 5 kV/cm 、体积分数约为 40% 时，导体镶嵌型电流变液的剪切强度可达 100 kPa 以上。镶嵌的导体微团与电介质颗粒结合稳固，能很好地承受持久摩擦和温度变化^[18]。文中选用镶嵌纳米碳微粒的 TiO_2 颗粒作为电流变颗粒，其透射电镜 (TEM) 照片如图 2 所示 (颗粒的制备及其他表征信息见文献^[18])，将纳米碳微粒镶嵌在二氧化钛的表面和内部，碳微粒的直径为 $1\sim 10 \text{ nm}$ 。将电流变颗粒与硅油混合制得电流变液，再选用二氧化硅作为磨料加入其中，即可制得电流变抛光液。

1.2 电流变抛光技术基本原理

电流变抛光的基本原理如图 3 所示。在零电场下 (图 3a)，电流变颗粒和磨料颗粒均匀分布在抛光液基液中，抛光液的剪切强度较低。当抛光头运动，工件与磨料二者之间有相对运动时，不能达到去除工件表面突起部分所需的作用力，因此抛光效率较低。

在电场的作用下，电流变抛光液的剪切强度大大提高，抛光液中的电流变颗粒形成了链状或柱状结构，将磨料颗粒夹持在其中 (图 3b)，形成了一个柔性的抛光头。当抛光头运动时，电流变颗粒对磨料颗粒施加正压力 F 和剪切力 τ ，则磨料对工件表面产生

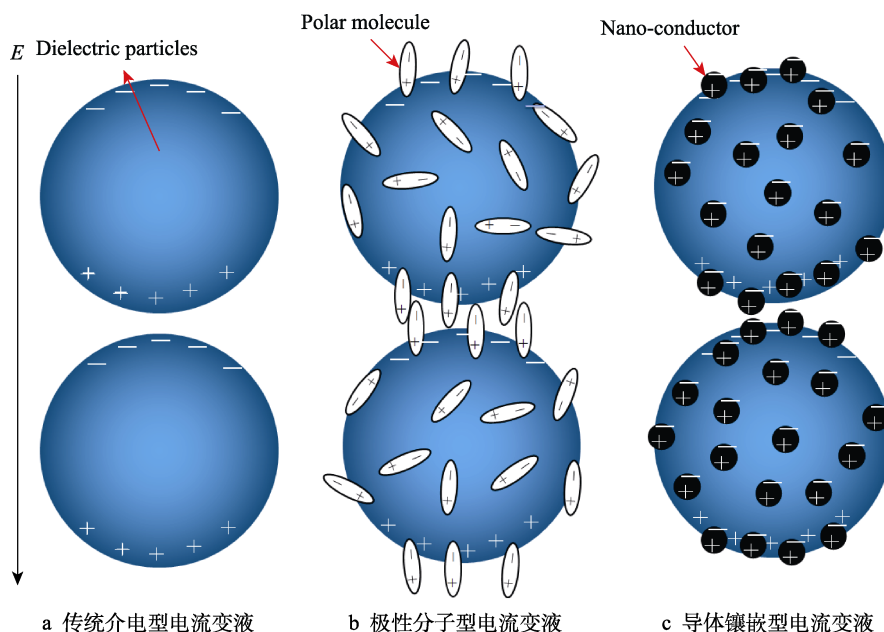


图 1 电流变液颗粒模型示意图

Fig.1 Diagram of ERF model: a) traditional ERF; b) polar molecule dominated ERF; c) nano-conductor dominated ERF

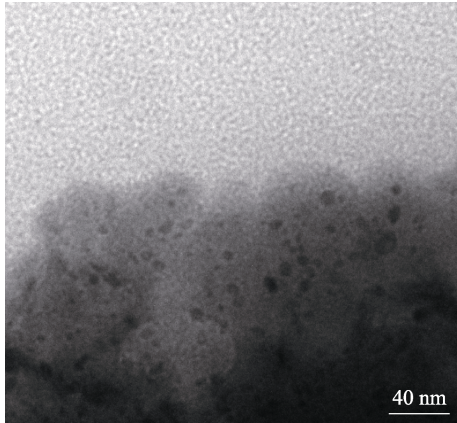


图 2 二氧化钛颗粒边缘的透射电镜照片
(二氧化钛中的黑色斑点为纳米碳微粒)

Fig.2 TEM images of edge of C-TiO₂ particle (the black dots in the TiO₂ particles are the nanocarbon clusters)

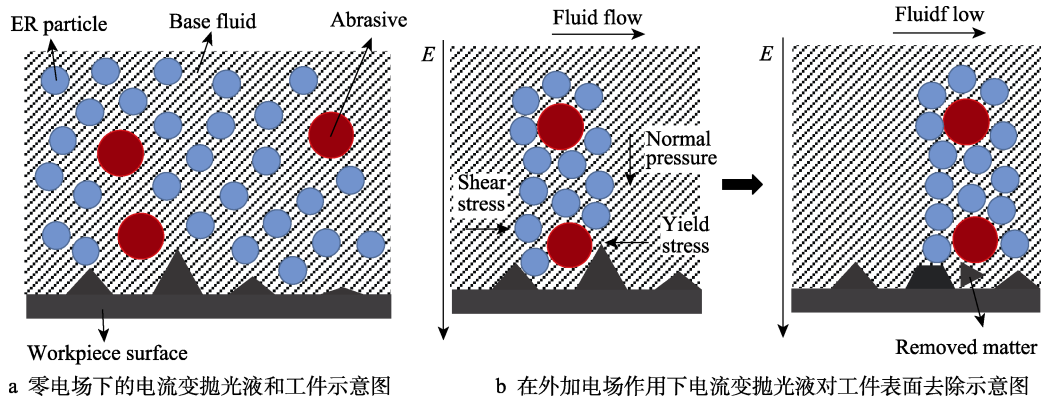


图 3 电流变抛光原理

Fig.3 Schematic diagram of ER polishing: a) diagram of workpieces and ER polishing fluids without electric field; b) diagram of polishing the surface of workpieces using ER fluids under an applied electric field

2 电流变抛光液的制备与流变性能测试

2.1 不同粒径磨料(二氧化硅)对电流变抛光液性能的影响

在抛光试验中,粗抛光和精抛光需要使用不同的抛光液,其区别在于磨料粒径的不同。粗抛所需抛光液应选用粒径较大的磨料,以增大去除效率,但大粒径磨料会划伤工件表面,表面粗糙度降至一定值后稳定,甚至上升。如果需要得到更好的抛光效果,则应选用粒径较小的磨料,它可以减小划伤表面的可能性,提高表面质量^[9]。磨料粒径对抛光效果有着重要影响,是调节抛光液适用于粗抛光还是精抛光的关键因素。实验选取了 3 种不同粒径(2 μm、200 nm、20 nm)的二氧化硅作为磨料制备电流变抛光液,具体过程如下。

分别将 3 种不同粒径的二氧化硅磨料与碳镶嵌二氧化钛放入研钵中混合均匀,再加入二甲基硅油(黏度为 480 mPa·s),仔细研磨均匀后,在 150 ℃下热处理 1 h,除去吸附水,得到 3 种电流变抛光液。

微切削作用,实现了对工件的抛光^[23-24]。在抛光过程中,通常用 Preston 方程来表述抛光材料去除率(Material Removal Rate, MRR)^[25],见式(1)。

$$R_{MRR} = k \cdot F \cdot v \quad (1)$$

式中: R_{MRR} 为材料去除率; F 为正压力; v 为工件与抛光头之间的相对速度; k 为 Preston 系数。

对抛光起作用的是正压力导致的剪切力 τ , $\tau = F \cdot \mu$, μ 为抛光表面摩擦因数。电流变抛光的情况有所不同,在抛光时为柔性接触,正压力不再是直接的影响因素,起决定作用的是电流变抛光液的剪切强度 $\tau(E)$ 。电流变抛光的材料去除率也可类似地表述为式(2)。

$$R_{MRR} = k_{ER} \cdot \tau(E) \cdot v \quad (2)$$

$\tau(E)$ 会随着施加电场强度 E 的增大而增大,即可通过调节电场强度 E 来改变抛光材料去除率。系数 k_{ER} 与工件和电流变抛光液材质相关。

其中,磨料的体积分数均为 4%,二氧化钛的体积分数均为 45%。笔者还制备了未加磨料的电流变液作为对照组。采用安东帕 MCR302 型旋转流变仪的平板系统进行电流变效应测试,其中转子型号为 PP15E,直径为 15 mm,间隙设定为 1 mm。

碳镶嵌二氧化钛电流变抛光液和电流变液的屈服强度随电场的变化如图 4 所示。由图 4 可看出,它们的剪切强度均随着电场的增大而上升,在相同电场强度下,它们的剪切强度的差别很小。结果表明,在磨料的体积分数为 4% 的条件下,二氧化硅颗粒对电流变效应的影响很小。原因:二氧化硅的介电常数很小,约为 2.5,且未镶嵌碳微粒对电流变效应基本无贡献。在抛光过程中,这些二氧化硅磨料是被成链的二氧化钛颗粒裹挟运动而产生抛光效果的。值得注意的是,在 2.5 kV/mm(实际抛光时采用的电场强度)下,剪切强度可达 16 kPa 左右,完全满足抛光对剪切强度的要求,大大优于已报道的电流变抛光材料^[5,8-13]。同时,流变仪的电流表显示,3 种电流变抛光液在电场强度 2.5 kV/mm 下,漏电流密度均小于 1 μA/cm²,显示出低能耗的优点,大大低于磁流变抛光的能耗^[6]。

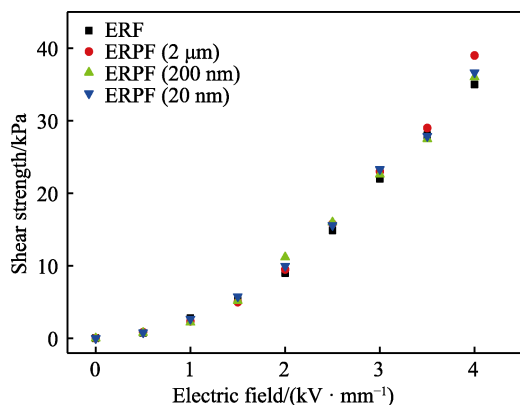


图4 电流变液及添加不同粒径磨料的电流变抛光液的剪切强度与电场强度的关系

Fig.4 Relationship between shear strength and electric field strength of ERF and ERPF with different abrasive sizes

2.2 电流变抛光液的温度稳定性

在抛光时因摩擦生热,抛光液的温度会有所上升。如果电流变抛光液在电场下的剪切强度随温度的变化较大,就会出现去除函数不稳定、抛光不均匀等问题,因此电流变抛光液应该具有良好的温度耐受性和温度稳定性。

如图5所示,电流变抛光液(添加200 nm磨料)在电场下的剪切强度在25~125℃温度区间显示出很好的温度稳定性。温度稳定性主要与介电颗粒的结构稳定性相关,新型电流变液所用的介电颗粒是碳镶嵌的二氧化钛颗粒,它具有结合稳固、对温度不敏感等特点。另外,添加2 μm和20 nm磨料的电流变抛光液的温度稳定性也很好。这种电流变液可以耐受175℃的较高温度。

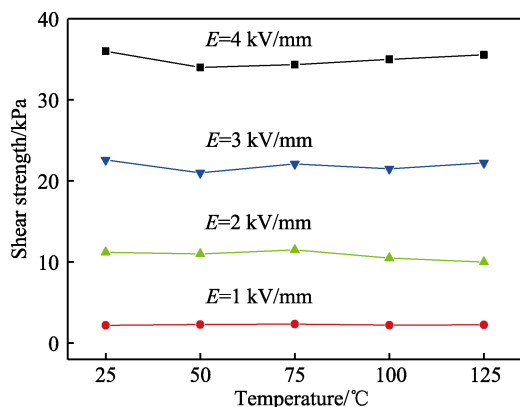


图5 在不同温度下电流变抛光液(200 nm磨料)剪切强度的变化情况

Fig.5 Shear strength of ERPF (with 200 nm abrasive) under different temperature

2.3 电流变抛光液的使用寿命

在抛光时,电流变抛光液中的磨料颗粒和电介质颗粒与工件表面碰撞、摩擦,导致电介质颗粒结构被

破坏,工件表面掉落的微粒掺入抛光液中。两者都可能使抛光液的性能下降,进而导致抛光效率下降,因此在实际使用中抛光液的寿命也是非常重要的因素。

添加了200 nm磨料的电流变抛光液在电场强度2.5 kV/mm下,经过200 h连续抛光后,其剪切强度的变化如图6所示。结果表明,在抛光200 h后抛光液的剪切强度基本不变。这表明电流变颗粒的结构稳定、性质稳定、耐磨性好,也表明电流变抛光液对抛光过程中工件上掉落的少量杂质(如微小的硅颗粒)不敏感。添加2 μm和20 nm磨料的电流变抛光液具有相同的性质。

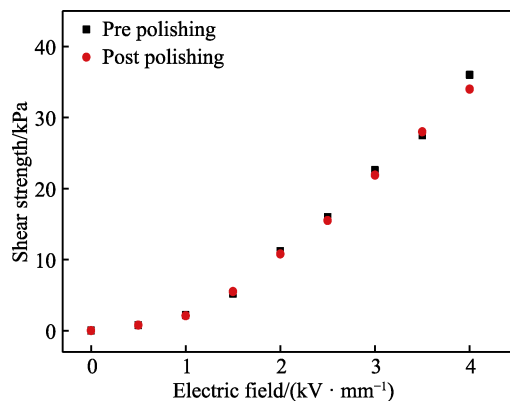


图6 电流变抛光液使用200 h后剪切强度随电场强度的变化情况

Fig.6 Shear stress of ERPF plotted as a function of electric field intensity before and after polishing for 200 h

3 电流变抛光实验

3.1 电流变抛光装置

电流变抛光机及其原理如图7所示。抛光头采用集成电极工具系统^[9],将2个铜片安装于绝缘的联轴器上,通过电线与联轴器上的2个导电环相连,并通过电刷与高压源相连,通过改变极板间电压,调节施加于电流变抛光液的电场。在极板下端凝聚1个柔性的抛光头,抛光头由电机带动旋转,使得柔性抛光头与工件(硅片)做相对运动,从而实现对工件表面的抛光。其中,抛光头铜电极的厚度为3 mm,长度和宽度均为10 mm,电极之间的间隙为1 mm。

3.2 电流变抛光实验及效果

抛光所用工件为硅研磨片,其直径为2.54 cm,厚度为1 mm,电阻率为 $10^6 \Omega \cdot \text{m}$,硅片的初始形貌如图8a所示,初始粗糙度为205 nm,最大凸起高度约为2.5 μm。将硅片粘贴于载液盘中,利用z轴平台将硅片与电极之间的间隙调整至0.3 mm。将电极之间的电压调整为2.5 kV。由于电极与工件的间隙较小,工件表面电流变抛光液中的颗粒大多以平行链排列,因此其剪切强度近似于平行板模式(图4)下测得的

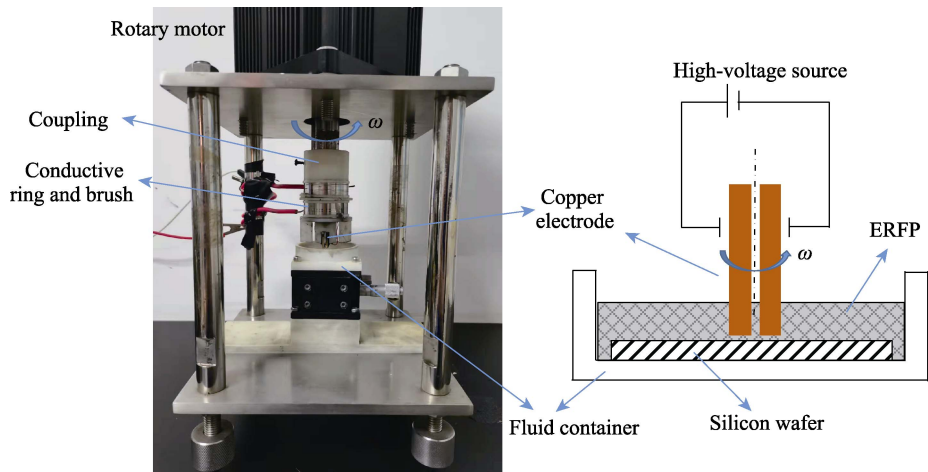


图 7 电流变抛光实验装置的实物图和原理示意图
Fig.7 Picture and schematic diagram of experimental device of ER polishing

剪切强度, 约为 16 kPa^[26]。电极绕转轴做旋转运动, 转速为 15 r/min。在抛光一段时间后, 将载液盘加热至 100 ℃, 取出硅片, 采用无水乙醇冲洗, 并用无纺布擦拭硅片。采用光学显微镜 (LEICA DM2500P) 观察抛光前后硅片表面形貌的变化, 并采用原子力显微镜 (本原纳米 CSPM5500 扫描探针显微镜) 测定硅片的形貌和粗糙度 (随机选取 5 个点, 取平均值)。

由于硅片的初始粗糙度较高, 首先采用添加了 2 μm 磨料的电流变抛光液进行粗抛。作为对照, 在零电场下对硅片进行抛光。由图 9 可知, 经过 4 h 的抛光, 硅片的表面粗糙度基本无变化, 说明抛光液的剪切强度较低时, 无法对工件表面进行去除。在施加电场后, 每抛光 1 h 后将硅片取出, 并测定其表面粗糙度, 表面粗糙度随时间的变化情况如图 9 所示。在抛光 3 h 后, 硅片的表面粗糙度由 205 nm 降至 6.4 nm, 然后其表面粗糙度不再下降, 抛光效果如图 8b 所示。

结果表明, 含较粗磨料的抛光液能对工件表面较大的不平整部分进行有效去除, 使工件的表面粗糙度降为纳米级。同时可观察到硅片表面的划痕明显, 表明大粒径的磨料会损伤工件表面。划痕具有方向性, 与抛光液的流动方向相同, 表明电流变抛光过程中的去除由机械切削作用中的剪切力引起。

为了进一步提高表面质量, 采用添加了 200 nm 磨料的电流变抛光液对粗抛后的硅片进行精抛 (如图 9 所示)。在抛光 2 h 后, 硅片的表面粗糙度不再下降, 抛光结果如图 8c 所示。粗抛产生的划痕大部分被抹除, 只留下一些小突起, 其表面粗糙度降至 0.46 nm。再进一步使用添加了 20 nm 磨料的电流变抛光液进行 2 h 的精抛, 表面粗糙度最终降至 0.36 nm。精抛的结果表明, 利用添加了较小粒径磨料的电流变抛光液能消除划痕, 有效提高了表面质量。

对比参考文献[5,8-13]中的电流变抛光实验, 文

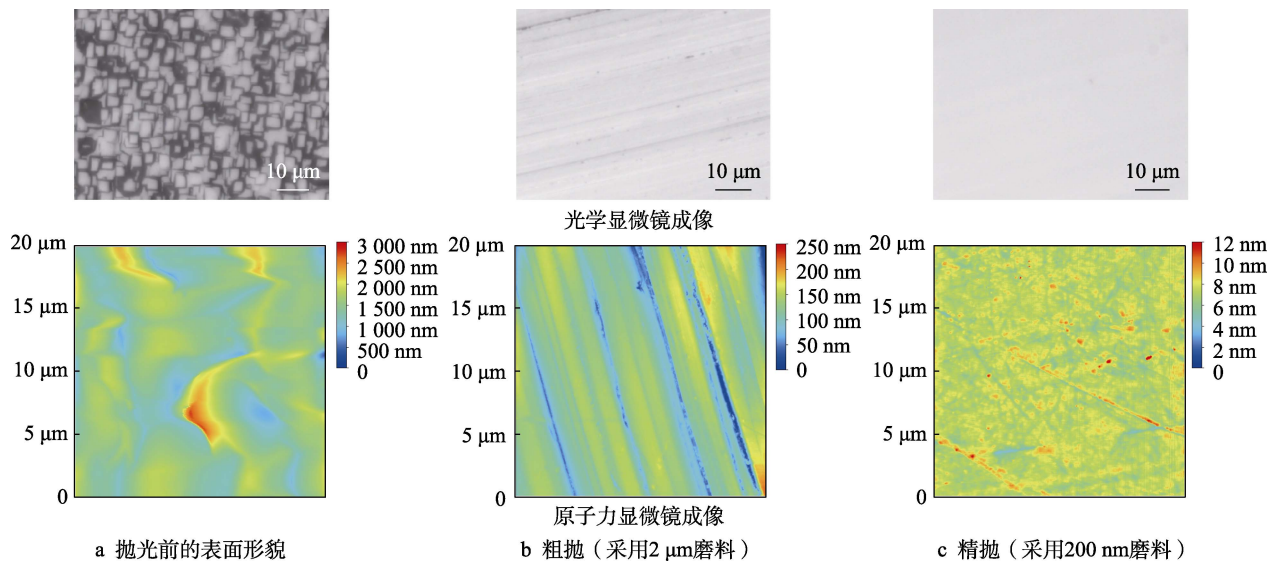


图 8 硅片的表面形貌
Fig.8 Surface morphology of silicon wafer: a) surface morphology before polishing;
b) rough polishing (with 2 μm abrasive); c) fine polishing (with 200 μm abrasive)

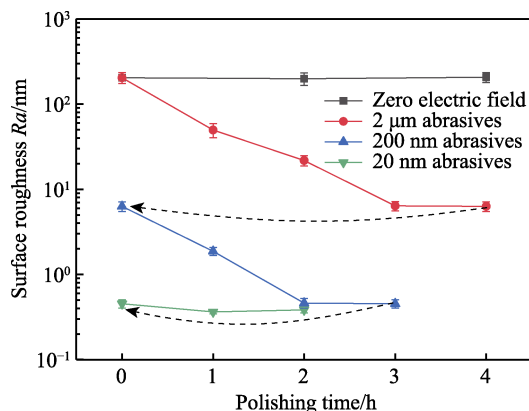


图9 硅片的表面粗糙度与抛光时间的关系
Fig.9 Relationship between surface roughness and polishing time of silicon wafer

中所用工件的初始粗糙度最大,抛光后的最终粗糙度最小,显示出良好的抛光效果。另外,由于新型电流变抛光液具有高剪切强度的优势,在抛光过程中不需要将电极与工件之间的间隙维持在数十微米内,这会大大减轻机械控制难度。

4 结论

1) 以二氧化硅为磨料,所制的碳镶嵌二氧化钛电流变抛光液具有高剪切强度 (>30 kPa)、低漏电流 (<1 μ A)、高温稳定性 ($25\sim125$ $^{\circ}$ C)、长寿命等优点。

2) 搭建了简易的电流变抛光装置,采用碳镶嵌二氧化钛电流变抛光液对硅研磨片进行电流变抛光。经粗抛后,硅片的表面粗糙度从 205 nm 降至 6.4 nm,进一步精抛后,硅片的表面粗糙度降至 0.36 nm,得到了较高质量的表面。文中提出的新型电流变抛光液可应用于更多场景中,比如:应用于机床,实现曲面的抛光;将抛光装置小型化,实现对复杂器件的抛光等。

参考文献:

- [1] CAO Jian-guo, MA Zong-qiao, NIE Meng. Investigation into Rheological Properties of Magnetorheological Polishing Slurry Using A-Cellulose as an Additive Agent and Its Polishing Performance[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2020, 21(11): 2041-2050.
- [2] 路家斌, 阎秋生, 潘继生, 等. 电磁流变效应微磨头加工的电磁耦合协同作用机理实验[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2485-2491.
LU Jia-bin, YAN Qiu-sheng, PAN Ji-sheng, et al. Experiments of Synergistic Effect of Electro-Magnetically Coupled Field in EMR Finishing[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(11): 2485-2491.
- [3] REN Kai, LUO Xiao, ZHENG Li-gong, et al. Belt-MRF for Large Aperture Mirrors[J]. Optics Express, 2014, 22(16): 19262-19276.
- [4] SIDPARA A M. Magnetorheological Finishing: A Perfect Solution to Nanofinishing Requirements[J]. Optical Engineering, 2014, 53(9): 092002.
- [5] LIU Xiao-han, WANG Jing-si, TENG De-zhi, et al. Electrorheological Fluid-Assisted Ultrasonic Polishing for IN625 Additively Manufactured Surfaces[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 120(1/2): 891-905.
- [6] 李龙响. 大口径非球面磁流变加工的关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2016: 131-133.
LI Long-xiang. Research on Key Technology of Magnetorheological Machining of Large Aperture Aspheric Surface[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016: 131-133.
- [7] 李圣怡. 太空“千里眼”的神奇光学制造技术[J]. 中国基础科学, 2017, 19(1): 24-26.
LI Sheng-yi. Mystic Manufacturing Technology for "Clairvoyance" in the Space[J]. China Basic Science, 2017, 19(1): 24-26.
- [8] LU J B, YAN Q S, TIAN H, et al. Polishing Properties of Tiny Grinding Wheel Based on Fe_3O_4 Electrorheological Fluid[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(11): 4954-4957.
- [9] 张雷, 贺新升, 张莹, 等. 新型电流变抛光工具开发及其抛光实验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2010, 40(4): 1009-1014.
ZHANG Lei, HE Xin-sheng, ZHANG Ying, et al. Development of a New Electrorheological Polishing Tool and Its Polishing Experiment[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2010, 40(4): 1009-1014.
- [10] KURIYAGAWA T, SAEKI M, SYOJI K. Electrorheological Fluid-Assisted Ultra-Precision Polishing for Small Three-Dimensional Parts[J]. Precision Engineering, 2002, 26(4): 370-380.
- [11] KIM W B, LEE S J, KIM Y J, et al. The Electromechanical Principle of Electrorheological Fluid-Assisted Polishing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(1): 81-88.
- [12] SU Jing-shi, CHENG Hao-bo, FENG Yun-peng, et al. Study of a Wheel-Like Electrorheological Finishing Tool and Its Applications to Small Parts[J]. Applied Optics, 2016, 55(4): 638-645.
- [13] ZHAO Yun-wei, LIU Xiao-min, FANG Yu-hui, et al. Ultra-Precision Processing of Conductive Materials via Electrorheological Fluid-Assisted Polishing[J]. Advanced Engineering Materials, 2021, 23(3): 2001109.
- [14] 田硕. 巨电流变抛光液性能分析与抛光实验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012: 41-56.
TIAN Shuo. Performance Analysis and Polishing Experimental Study of Giant Electrorheological Polishing

- Solution[D]. Changchun: Jilin University, 2012: 41-56.
- [15] SHEN Rong, WANG Xue-zhao, LU Yang, et al. Polar-Molecule-Dominated Electrorheological Fluids Featuring High Yield Stresses[J]. *Advanced Materials*, 2009, 21(45): 4631-4635.
- [16] LU Kun-quan, SHEN Rong. The Characteristics of Polar Molecule ER Fluids and a New Type of Polar Molecule ER Fluid[J]. *Smart Materials and Structures*, 2017, 26(5): 054005.
- [17] 尤伟伟. 磁流变抛光的关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004: 4-9.
YOU Wei-wei. Research on Key Technology of Magnetorheological Polishing[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004: 4-9.
- [18] QIU Zhao-hui, SHEN Rong, HUANG Jing, et al. A Giant Electrorheological Fluid with a Long Lifetime and Good Thermal Stability Based on TiO_2 Inlaid with Nanocarbons[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(19): 5816-5820.
- [19] WEN Wei-jia, HUANG Xian-xiang, YANG Shi-he, et al. The Giant Electrorheological Effect in Suspensions of Nanoparticles[J]. *Nature Materials*, 2003, 2(11): 727-730.
- [20] MA H, WEN W, TAM W Y, et al. Frequency Dependent Electrorheological Properties: Origin and Bounds[J]. *Physical Review Letters*, 1996, 77(12): 2499-2502.
- [21] WU X F, ZHOU L W, HUANG J P. Effect of Mechanical Abrasion in Polar-Molecular Electrorheological Fluids[J]. *The European Physical Journal Applied Physics*, 2009, 48(3): 31301.
- [22] YAN Ren-jie, WU Jing-hua, LI Cong, et al. Temperature Effects of Electrorheological Fluids Based on One-Dimensional Calcium and Titanium Precipitate[J]. *Chinese Physics Letters*, 2013, 30(1): 016202.
- [23] LI Min, LYU Bing-hai, YUAN Ju-long, et al. Shear-Thickening Polishing Method[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, 94: 88-99.
- [24] ZHAO Yun-wei, GENG De-xu, LIU Xiao-min. An Investigation on Electrorheological Fluid-Assisted Polishing Process for Tungsten Carbide[J]. *Journal of Computers*, 2012, 7(11): 2742-2749.
- [25] PRESTON F W. The Theory and Design of Plate Glass Polishing Machines[J]. *J Soc Glass Tech*, 1927, 11: 214-256.
- [26] WANG De, JIAO Ming-chun, SUN Gang, et al. Electrorheological Response Measured with Pectinated Electrodes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(19): 194103.

责任编辑: 彭颖

(上接第 196 页)

- [32] AABOUBI O, CHOPART J P, DOUGLADE J, et al. Magnetic Field Effects on Mass Transport[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1990, 137(6): 1796-1804.
- [33] HINDS G, COEY J M D, LYONS M E G. Influence of Magnetic Forces on Electrochemical Mass Transport[J]. *Electrochemistry Communications*, 2001, 3(5): 215-218.
- [34] GROSSINGER R, KEPLINGER F, MEHMOOD N, et al. Magnetic and Microstructural Investigations of Pipeline Steels[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2008, 44(11): 3277-3280.
- [35] WEI Bo-xin, QIN Qing-yu, FU Qi, et al. X80 Steel Corrosion Induced by Alternating Current in Water-Saturated Acidic Soil[J]. *Corrosion*, 2020, 76(3): 248-267.
- [36] YANG Yong. Effect of Magnetic Field on Corrosion Behavior of X52 Pipeline Steel in Simulated Soil Solution[J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2021: ArticleID: 211010.
- [37] 杨永, 王新华, 陈迎春, 等. 交流干扰下 X100 管线钢及其热影响区在库尔勒土壤模拟液中的腐蚀行为[J]. *工程科学学报*, 2020, 42(7): 894-901.
YANG Yong, WANG Xin-hua, CHEN Ying-chun, et al. Corrosion Behavior of X100 Pipeline Steel and Its Heat-Affected Zones in Simulated Korla Soil Solution under Alternating Current Interference[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2020, 42(7): 894-901.
- [38] 杨永, 罗艳龙, 孙明, 等. 油气管道交流杂散电流腐蚀研究进展[J]. *石油学报*, 2021, 42(9): 1247-1254.
- YANG Yong, LUO Yan-long, SUN Ming, et al. Research Advances in Stray Alternating Current Corrosion of Oil and Gas Pipelines[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(9): 1247-1254.
- [39] GRANT K M, HEMMERT J W, WHITE H S. Magnetic Field-Controlled Microfluidic Transport[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2002, 124(3): 462-467.
- [40] SUEPTITZ R, TSCHULIK K, UHLEMANN M, et al. Magnetic Field Effects on the Active Dissolution of Iron[J]. *Electrochimica Acta*, 2011, 56(17): 5866-5871.
- [41] MONZON L M A, COEY J M D. Magnetic Fields in Electrochemistry: The Lorentz Force. a Mini-Review[J]. *Electrochemistry Communications*, 2014, 42: 38-41.
- [42] MONZON L M A, COEY J M D. Magnetic Fields in Electrochemistry: The Kelvin Force. a Mini-Review[J]. *Electrochemistry Communications*, 2014, 42: 42-45.
- [43] 刘智勇, 李宗书, 湛小琳, 等. X80 钢在鹰潭土壤模拟溶液中应力腐蚀裂纹扩展行为机理[J]. *金属学报*, 2016, 52(8): 965-972.
LIU Zhi-yong, LI Zong-shu, ZHAN Xiao-lin, et al. Mechanism of Stress Corrosion Cracking Propagation of X80 Steel in Yingtan Simulated Soil Solution[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2016, 52(8): 965-972.
- [44] KAMESUI G, NISHIKAWA K, MATSUSHIMA H, et al. In Situ Observation of Cu^{2+} Concentration Profile during Cu Dissolution in Magnetic Field[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2021, 168(3): 031507.

责任编辑: 万长清