

固结磨料抛光 LiB_3O_5 晶体的抛光液优化

李 军^{1,2}, 李 标^{1,2}, 胡章贵³, 朱永伟^{1,2}, 左敦稳^{1,2}

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016; 2. 江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 南京 210016;
3. 中国科学院功能晶体与激光技术重点实验室, 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190)

摘 要: LiB_3O_5 (LBO)非线性光学晶体软、脆的特点增加了超精密加工的难度。采用固结磨料抛光技术对 LBO 晶体(110)面进行抛光, 研究酸性、中性和碱性抛光液 pH 值调节剂及 pH 值对晶体抛光材料去除率、表面形貌和表面粗糙度的影响。结果表明: 酸性抛光液对 LBO 晶体表面的腐蚀作用太大, 中性抛光液的腐蚀作用太小, 不适合抛光 LBO 晶体; 乙二胺配制 pH 值为 11 的无磨料碱性抛光液固结磨料抛光 LBO 晶体(110)面, 获得高的晶体表面质量, 表面粗糙度 S_a 为 1.94 nm, 表面损伤小。

关键词: 三硼酸锂晶体; 固结磨料抛光; 材料去除率; 表面形貌; 表面粗糙度

中图分类号: TG356.28; TG580.692 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2013)06-0789-08

网络出版时间: 2013-05-21 16:36:22 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2310.TQ.20130521.1636.012.html>

Optimization of Fixed Abrasive Polishing Slurry for LiB_3O_5 Crystal

LI Jun^{1,2}, LI Biao^{1,2}, HU Zhanggui³, ZHU Yongwei^{1,2}, ZUO Dunwen^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-Manufacturing Technology, Nanjing 210016, China; 3. Key Laboratory of Functional Crystals and Laser Technology, Technical Institute of Physics Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: It is rather difficult to process LiB_3O_5 (LBO) nonlinear optical crystal by ultraprecision machining due to its soft and brittle properties. The LBO crystal (110) surface was polished by using a fixed abrasive polishing technology. The effects of acidic, neutral and alkaline slurry pH regulator and pH value on the removal rate of crystal polishing, surface topography and surface roughness of the material were investigated. The results show that the corrosive effect of the acidic slurry on the LBO crystal surface is dominant, and the effect of the neutral slurry on the LBO crystal surface is slight, causing the inappropriate polishing of LBO crystal. However, the abrasive-free alkaline slurry with ethylenediamine and pH value of 11 can be effective for fixed abrasive polishing of LBO crystal (110) surface, obtaining a high surface quality of the crystal with the surface roughness S_a of 1.94 nm and the rather slight surface damage.

Key words: lithium triborate crystal; fixed abrasive polishing; material removal rate; surface topography; surface roughness

三硼酸锂(LiB_3O_5 , LBO)晶体是全固态激光技术中应用最广泛的非线性光学晶体^[1]。LBO 晶体是一种较软的脆性材料, Mohs 硬度约为 6, 在加工过程中, 除出现崩边、开裂等缺陷外, 还极易出现磨料颗粒的嵌入问题^[2-3]。固结磨料抛光技术是高效、高精度晶体加工的一种新技术。固结磨料抛光技术把抛光粉固结在抛光垫中, 采用不含游离抛光粉的

抛光液加工, 避免游离抛光粉颗粒随机分布损伤晶体表面, 提高抛光粉的利用率, 从而提高加工的材料去除率和工件的表面质量^[4-5]。

抛光液是化学机械抛光(chemical mechanical polishing, CMP)技术的关键因素, 其性能直接影响着抛光效率和被抛光工件的表面质量。传统抛光液的主要成分有磨料粒子、腐蚀介质以及添加剂, 抛

收稿日期: 2012-11-12。 修订日期: 2012-12-24。

基金项目: 国家自然科学基金项目(50905086, 51175260); 中央高校基本科研业务费专项资金(NP2012506) 江苏省高校优势学科建设工程资助。

第一作者: 李 军(1979—), 男, 博士, 副教授。

Received date: 2012-11-12. Revised date: 2012-12-24.

First author: LI Jun (1979—), male, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: junli@nuaa.edu.cn

光过程中既有机机械作用,又有化学作用;同时,肩负着润滑、恒温并且带走抛光废屑的作用。调节抛光液的添加剂和 pH 值会影响抛光材料去除率和工件的表面质量。Chen 等^[6]采用 CMP 技术抛光 Ta 金属,在抛光液中添加了醋酸和磷酸,材料去除率提高了 2~3 倍,表面粗糙度由原抛光液的 32.52 nm,分别降到 16.21 和 13.81 nm。Jeong 等^[7]在抛光液中添加一定量的 H₂O₂ 和柠檬酸,用 CMP 技术抛光 LiNbO₃ 晶体,获得的材料去除率最高、表面粗糙度最好。Nagar 等^[8]在 Cu 的 CMP 抛光中加入山梨酸钾,获得较好的抛光均匀性和低的凹陷。Wang 等^[9]用酸性(pH = 2)和碱性(pH = 11)抛光液 CMP 抛光 Ge₂Sb₂Te₅(GST),表明碱性抛光液对 GST 有较快的材料去除率和高的抛光选择性。Wang 等^[10]研究 CMP 抛光硅片中化学作用对材料去除率的影响,得出对于 CeO₂ 磨粒,当抛光液 pH 值为 10 时,材料去除率最高。Peddeti 等^[11]采用 HClO₄ 和 KOH 调节抛光液 pH 值,研究其对 CMP 技术抛光 Ge 材料去除率的影响,结果表明在碱性条件下有较高的材料去除率。

宋晓岚等^[12]研究抛光液的 pH 值及 H₂O₂ 浓度等抛光工艺参数对硅片化学机械抛光去除速率的影响,在 pH 值为 10.5 和 H₂O₂ 为 1% (体积分数)时,抛光速率出现最大值。陈志刚等^[13]研究以 SiO₂ 和聚苯乙烯微球为内核制备具有包覆结构的 CeO₂/SiO₂ 和 CeO₂/聚苯乙烯复合颗粒,分别用此复合磨料的抛光液抛光硅片后的表面粗糙度值分别为 0.292 nm 和 0.180 nm。张晓强等^[14]研究磷酸和酒石酸加入抛光液作为 pH 值调节剂对 GSI 阻挡层 CMP 抛光的影响,酒石酸对 Cu 和 Ta 有一定的络合作用,能够提高它们的去除速率;磷酸能提高 Ta 的去除速率,而对 Cu 的去除有抑制作用;同时,磷酸和酒石酸的加入能够有效改善 Cu 的表面状态。刘宇宏等^[15]比较了不同 pH 值下用 CMP 抛光 Cu 的效果,表明当 pH = 4 时可以得到较高的材料去除率和较优表面质

量。李军等^[16]研究不同颗粒抛光粉与不同抛光片 CMP 抛光 Nd:YAG 透明陶瓷,获得表面粗糙度的轮廓微观不平度的平均间距(RMS)值优于 0.2 nm 的高质量表面。李军等^[17-18]研究了抛光液的 pH 值对游离磨粒 CMP 抛光 LBO 晶体(001)面的影响,得出当抛光液 pH 值为 2 时材料去除率最高,而 pH 值为 4 时表面粗糙度最好。

固结磨料抛光中的抛光液,通常情况下不含有磨料粒子,避免划伤工件表面。无磨料抛光液主要由去离子水、表面活性剂和 pH 调节剂组成,针对不同的被抛光材料,pH 值调节剂的选择至关重要。针对 LBO 晶体(001)面,选择酸性(草酸、醋酸和柠檬酸)和碱性(环己胺、三乙胺和乙二胺)pH 值调节剂,研究不同调节剂及 pH 值抛光液对晶体抛光材料去除率和表面质量的影响,旨在获得较优的晶体表面质量。

1 实 验

采用 CETR CP-4 型 CMP 抛光和测试系统进行研磨抛光 LBO 晶体(110)面,晶体抛光面尺寸为 52 mm × 32 mm。抛光之前,采用 W30 金刚石固结磨料研磨垫研磨 LBO 晶体,研磨液为不含硬质磨粒的去离子水。采用相同的 CeO₂ 固结磨料抛光垫抛光 LBO 晶体^[19-20],无磨料抛光液主要由去离子水、表面活性剂和 pH 调节剂组成。表面活性剂为烷基酚聚氧乙烯醚(OP)乳化剂。pH 值调节剂分为弱酸性和弱碱性两类。弱酸类选用草酸、醋酸和柠檬酸分别配制 pH 为 4 的酸性抛光液;弱碱类选用环己胺、三乙胺和乙二胺分别配制 pH 值为 10 的碱性抛光液和不加调节剂的中性抛光液(即只有去离子水和表面活性剂,pH 值为 7)固结磨料抛光 LBO 晶体。

共进行 7 组抛光实验,获得最优的 pH 值调节剂。采用最优的 pH 值调节剂(乙二胺)配制 pH 值分别为 8、9、10 和 11 的碱性抛光液,优化抛光液的 pH 值。研磨抛光参数设置如表 1。

表 1 固结磨料研磨抛光参数

Table 1 Parameters of fixed abrasive lapping and polishing

Experiment	Pressure/kPa	Wafer speed/(r·min ⁻¹)	Pad speed/(r·min ⁻¹)	Slurry flowrate/(mL·min ⁻¹)	Slurry
Lapping	27.6	75	80	50	Without abrasive
Polishing	20.7	95	100	80	Without abrasive

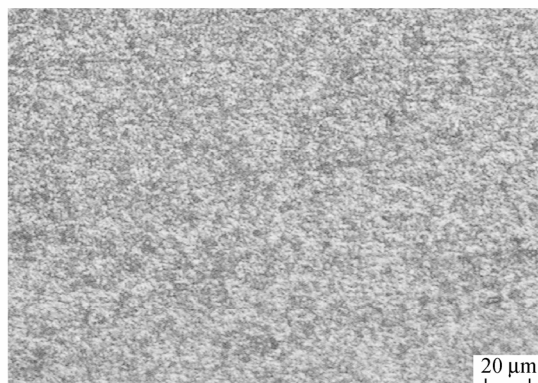
采用数显螺旋测微器测量抛光前后的多点晶体厚度,取抛光平均去除厚度除以时间得出抛光的材料去除率。采用 Mitutoyo MF 型显微镜观察研磨抛

光后的晶体表面形貌及宏观损伤。用 CSPM3000 型原子力显微镜观察研磨抛光后的表面微观形貌和测量表面粗糙度,扫描范围为 20 μm × 20 μm。

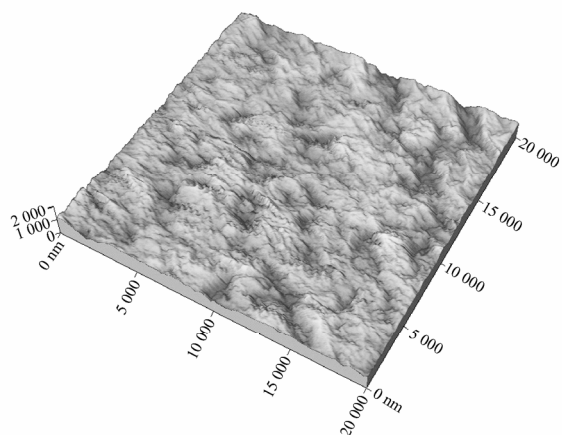
2 结果与讨论

2.1 研 磨

图 1 为用 W30 金刚石固结磨料研磨 LBO 晶体的表面的显微镜和原子力显微镜(AFM)形貌。从图 1 可以看出,由切割引起“片状”的较大损伤已去除,表面损伤主要是机械破碎损伤。表面微观损伤主要是机械作用引起的微突起和微凹坑,表面粗糙度(S_a)为 93.3 nm。研磨抛光液为不含腐蚀添加剂的去离子水,固结磨料研磨垫中磨料是 20~30 μm 的金刚石,所以材料的去除主要由金刚石的机械作用引起的,晶体表面损伤主要是机械破碎,表面损伤大。



(a) Surface topography by microscope



(b) Microscopic appearance by AFM

图 1 固结磨料研磨 LBO 晶体的表面形貌

Fig. 1 Surface topography of LBO crystal after fixed abrasive lapping

The LBO crystal (110) surface is lapped by using a W30 diamond fixed abrasive lapping pad; lapping slurry is deionized water.

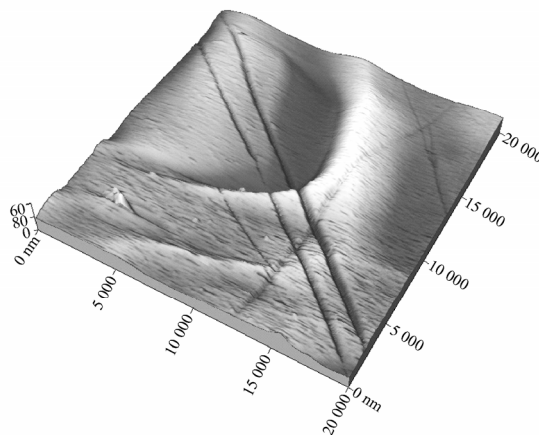
2.2 酸性和中性抛光液抛光

分别采用草酸、醋酸和柠檬酸作为调节剂配制 pH 值为 4 的酸性抛光液,用 CeO_2 固结磨料抛光垫

对 LBO 晶体表面进行抛光,抛光后的晶体表面形貌基本上相同,其差别不大,如图 2。从图 2 可以看出,晶体表面形成近似四方体的规则结构形貌,未见机械作用的损伤。表面微观损伤有机械作用形成的凹坑和划痕,表面粗糙度 S_a 为 14.7 nm。当抛光液是酸性时,对 LBO 晶体表面的腐蚀性较大,晶体表面呈现刻蚀的典型近似四方体的规则结构形貌,说明抛光过程中,化学作用过大,宏观上以化学腐蚀为主。晶体表面可以看到较大的微凹坑和微突起,微观上有固结磨料抛光垫表面磨粒的机械作用。



(a) Surface topography by microscope



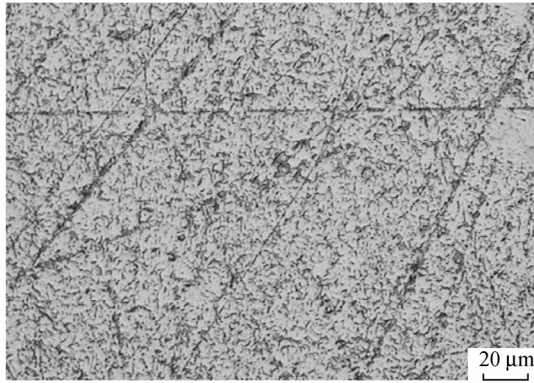
(b) Microscopic topography by AFM

图 2 酸性抛光液固结磨料抛光 LBO 晶体表面形貌

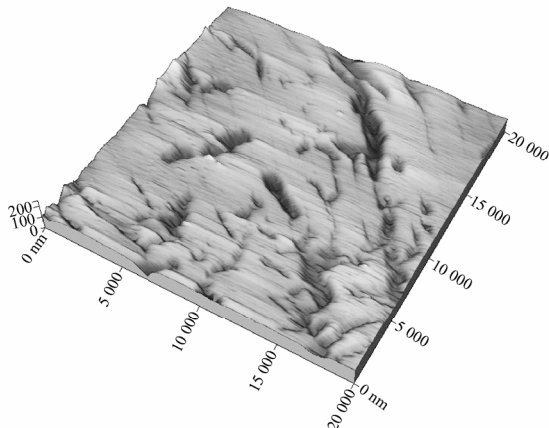
Fig. 2 Surface topography of LBO crystal after fixed abrasive polishing with acidic polishing slurry

The LBO crystal (110) surface is polished by using a CeO_2 fixed abrasive polishing pad, and acidic polishing slurry with a pH of 4 is composed of deionized water, surfactant and respectively using oxalic acid, acetic acid or citric acid as a pH adjusting agent composition.

采用不加调节剂的中性抛光液(即只有去离子水和表面活性剂, pH 值为 7)固结磨料抛光后的晶体表面形貌如图 3 所示。由图 3 可以看出,晶体表面的划痕、损伤较大,表面粗糙度 S_a 为 12.5 nm。中



(a) Surface topography by microscope



(b) Microscopic topography by AFM

图 3 中性抛光液固结磨料抛光 LBO 晶体表面形貌

Fig. 3 Surface topography of LBO crystal after fixed abrasive polishing with neutral slurry
Neutral polishing slurry with pH value of 7 composed of deionized water and surfactant composition.

性抛光液没有添加腐蚀剂及 pH 值调节剂, 抛光液的化学作用弱, 抛光主要由机械刻划作用去除晶体表面材料, 因而表面损伤以划痕为主。微观表面损伤主要是微凹坑。

以上分析可见, 酸性抛光液对 LBO 晶体表面的腐蚀作用太大, 中性抛光液的腐蚀作用太小, 都未能获得高质量的晶体表面。

2.3 碱性抛光液抛光

2.3.1 碱性调节剂优化 采用环己胺、三乙胺和乙二胺作为调节剂分别配制 pH 值为 10 的碱性抛光液, 用此 3 种碱性抛光液固结磨料抛光 LBO 晶体的材料去除率如图 4 所示。从图 4 可见, 三乙胺抛光液的材料去除率最高, 为 60.8 nm/min; 其次是乙二胺, 材料去除率为 43.4 nm/min, 最小为环己胺, 去除率为 31 nm/min。

pH 为 10 的 3 种碱性抛光液固结磨料抛光 LBO 晶体的表面形貌如图 5。由图 5 可以看出, 划痕和

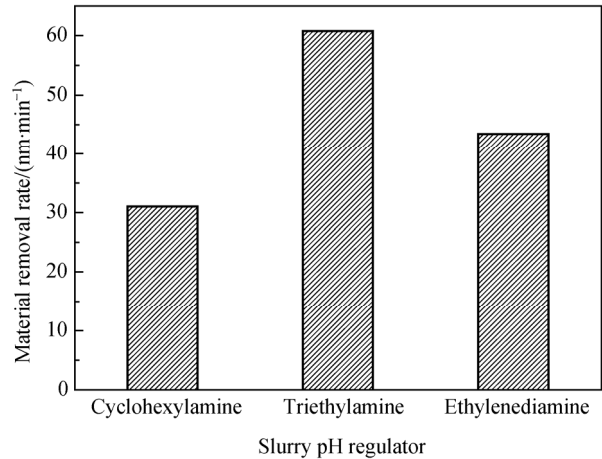


图 4 碱性抛光液固结磨料抛光 LBO 晶体的材料去除率

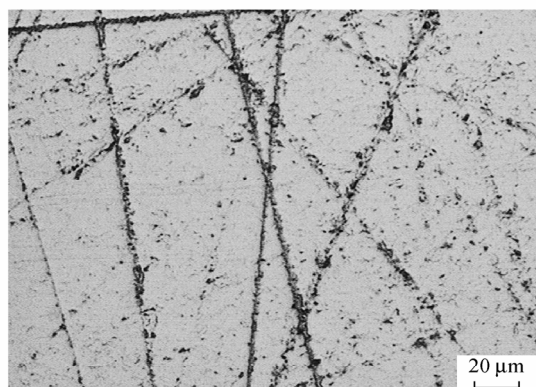
Fig. 4 Material removal rate of fixed abrasive polishing of LBO crystal with alkaline slurry

Alkaline polishing slurry with a pH value of 10 is composed of deionized water, surfactant and respectively using cyclohexylamine, triethylamine or ethylenediamine as a pH adjusting agent composition.

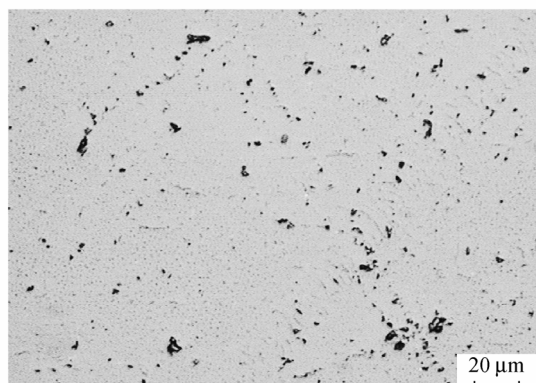
凹坑均小于酸性和中性抛光液加工后的表面, 表面质量明显提高。环己胺作为添加剂固结磨料抛光后的表面相对于其他两种调节剂, 表面有较大划痕和凹坑, 表面损伤大。三乙胺和乙二胺添加剂固结磨料抛光后的表面主要是凹坑, 表面损伤小, 显微镜观察两者的损伤差别不大。

AFM 测量的表面微观形貌如图 6。由图 6 可见, 3 种碱性抛光液固结磨料抛光后 LBO 晶体表面微观损伤相差不多。结合图 7 表面粗糙度值比较, 乙二胺抛光液加工后, 样品表面粗糙度 S_a 最好为 2.41 nm, 环己胺的最差, S_a 为 4.36 nm。

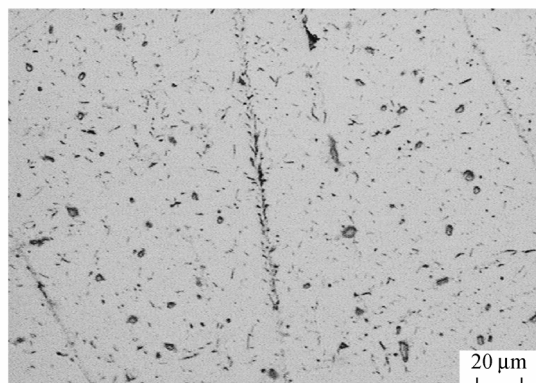
环己胺、三乙胺和乙二胺都是弱碱性物质, 添加到抛光液中调节抛光液 pH 值, 同时在抛光过程中也起腐蚀剂的作用。固结磨料抛光材料去除是抛光液的化学作用和固结磨料抛光垫表面凸起抛光粉机械作用共同作用的结果, 在 pH 值相同情况下, 抛光液的化学作用主要取决于腐蚀剂的活性或强弱。从分子结构上看, 三乙胺由 3 个 $-CH_2-CH_3$ 与 1 个 N 组成, 活性较强, 易于在晶体表面发生化学反应, 化学作用使晶体表面的表层变弱, 易被机械去除, 所以三乙胺调节剂抛光液的材料去除率最大。乙二胺有 2 个 $-NH_2$, 活性弱于三乙胺, 但优于环己胺只有 1 个 $-NH_2$, 则其材料去除率居中; 环己胺抛光液加工晶体的材料去除率最小。环己胺活性小, 不易与晶体表面发生化学反应, 材料去除以机械作用为主, 晶体表面划痕较大, 并以机械刻划损



(a) Cyclohexylamine



(b) Triethylamine

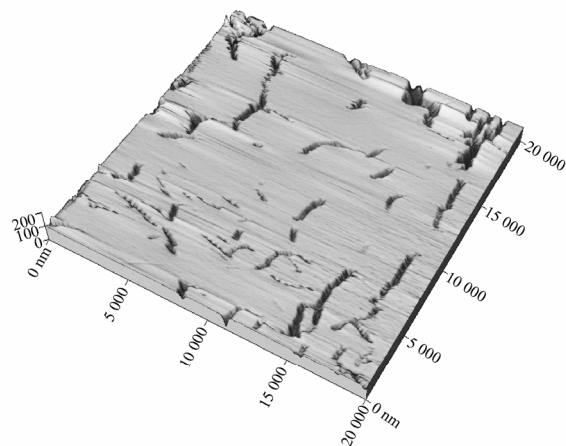


(c) Ethylenediamine

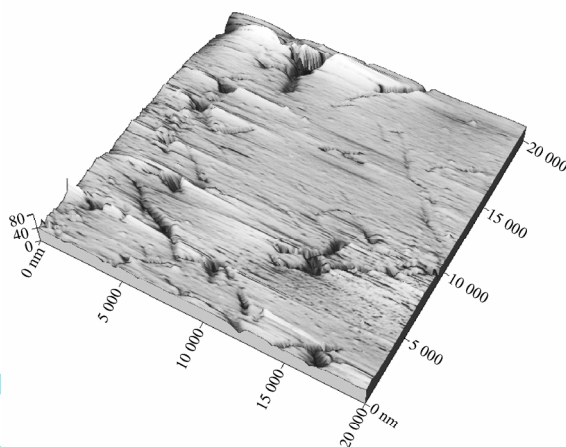
图 5 pH 为 10 的碱性抛光液固结磨料抛光晶体的表面形貌
Fig. 5 Surface topographies of fixed abrasive polishing of LBO crystal with alkaline slurry with pH value of 10

伤为主，微观损伤也较大，如图 5a；表面粗糙度 S_a 较大为 4.36 nm。三乙胺和乙二胺的化学活性较强，抛光过程中，化学反应的软质层可以被机械作用及时去除，所以表面损伤小，表面粗糙度较好。

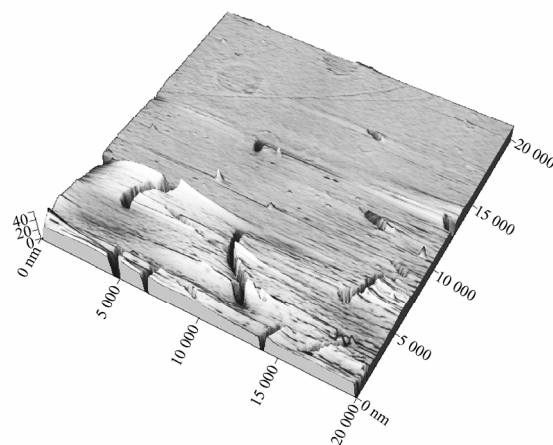
乙二胺作为调节剂调节抛光液 pH 值，固结磨料抛光 LBO 晶体材料去除率适中，表面损伤小于其他两种调节剂，表面粗糙度 S_a 最优为 2.41 nm，则晶体表面质量最优，所以实验选择乙二胺作为碱性调节剂调节抛光液 pH 值。



(a) Cyclohexylamine



(b) Triethylamine



(c) Ethylenediamine

图 6 pH 为 10 的碱性抛光液固结磨料抛光后的表面 AFM 微观形貌

Fig. 6 AFM microscopic topographies of fixed abrasive polishing of LBO crystal with alkaline slurry with pH value of 10

2.3.2 抛光液 pH 值优化 图 8 为用乙二胺调节剂调节的不同 pH 值抛光液固结磨料抛光 LBO 晶体的材料去除率。pH 值为 8 时，去除率最大，为 59.1 nm/min pH 值为 10 时，去除率最小，为 43.4 nm/min。

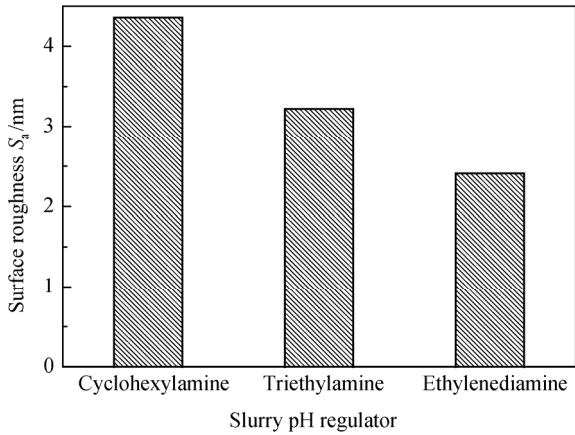


图 7 碱性抛光液固结磨料抛光后的表面粗糙度

Fig. 7 Surface roughness of fixed abrasive polishing of LBO crystal with alkaline slurry

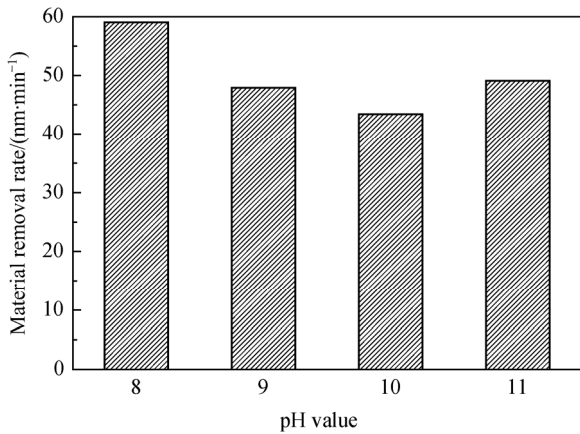


图 8 不同 pH 值抛光液抛光 LBO 晶体材料去除率

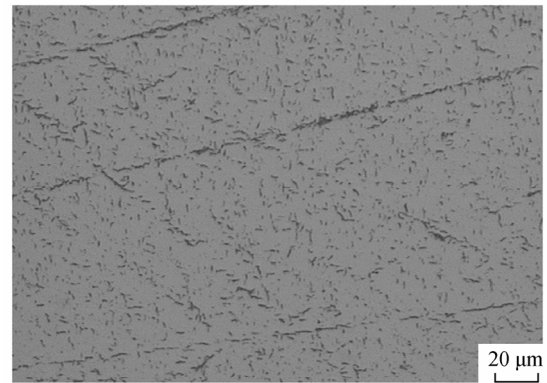
Fig. 8 Material removal rate of fixed abrasive polishing of LBO crystal with different pH values slurry

Alkaline polishing slurry is composed of deionized water, surfactant and using ethylenediamine as a pH adjusting agent composition, the same below.

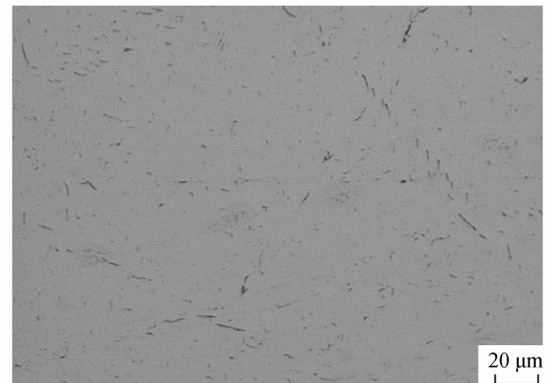
图 9 为不同 pH 值抛光液固结磨料抛光 LBO 晶体的表面形貌。从图 9 可以看出，pH 值为 8 时表面损伤较大。pH 值为 9 时与 pH 为 10 时的情况相差不多，但表面损伤小于抛光液 pH 值为 8 时加工的晶体表面。抛光液 pH 值为 11 时，表面损伤很小、表面质量最好。

图 10 为 AFM 测量不同 pH 值抛光液固结磨料抛光 LBO 晶体的 AFM 表面微观形貌。由图 10 可见，pH 值为 11 时的抛光液加工后晶体表面损伤少。结合图 11，pH 值为 8 的抛光液加工后表面粗糙度 S_a 最差，为 6.78 nm；pH 值为 11 时 S_a 最好，为 1.94 nm。

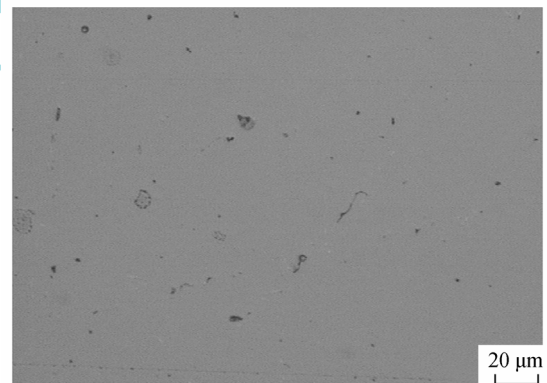
采用相同碱性调节剂调节抛光液 pH 值，调节剂对晶体表面的作用相同；抛光液 pH 值不同，对



(a) pH=8



(b) pH=9

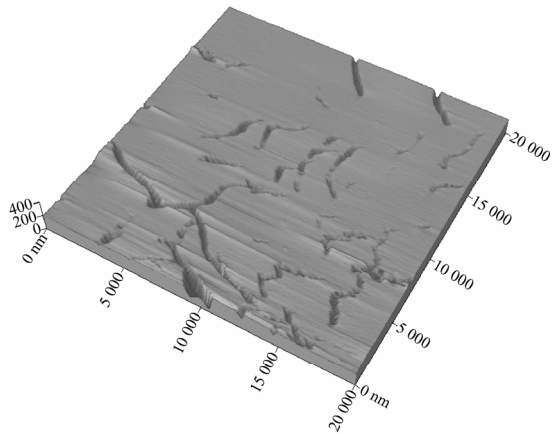


(c) pH=11

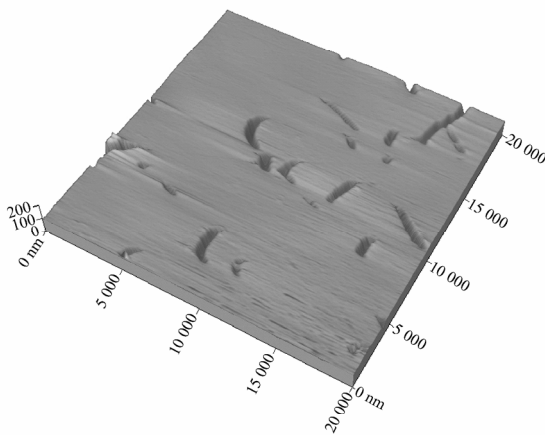
图 9 不同 pH 值抛光液抛光晶体的表面形貌

Fig. 9 Surface topographies of fixed abrasive polishing of LBO crystal with different pH values slurry

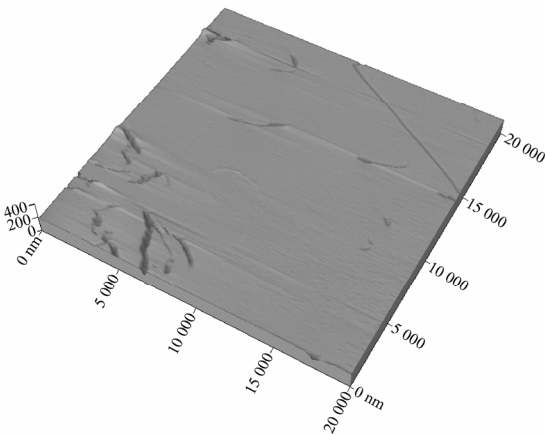
晶体表面化学作用的强弱不同。抛光的材料去除由化学作用和机械作用共同作用，材料去除率的大小和工件表面质量的好坏由化学作用与机械作用的相对强弱决定。当化学作用大于机械作用时，化学作用形成的软质层有一部分未来得及去除，继续覆盖在晶体表面，使晶体表面不光滑，晶体表面质量差，材料去除率低；当机械作用大于化学作用时，机械作用不仅完全去除化学作用形成的过渡软质层，还可能在晶体本体表面形成损伤，增大表面粗糙度，



(a) pH=8



(b) pH=9



(c) pH=11

图 10 不同 pH 值抛光液抛光后晶体 AFM 表面微观形貌
Fig. 10 AFM microscopic topographies of fixed abrasive polishing of LBO crystal with different pH values slurry

使材料去除率高。抛光材料去除率的提高有利于提高加工过程的效率，可是较高的材料去除率并不一定能够形成高质量的晶体表面，只有当化学作用与机械作用相当时，化学作用形成的过渡软质层及时

被机械作用去除，才能获得较低的表面粗糙度、较小损伤的高质量晶体表面^[21]。

采用固结磨料抛光 LBO 晶体(110)面，当抛光液 pH 值为 8 时，抛光液的化学作用较弱，抛光的机械作用大于化学作用，材料去除率最大为 59.1 nm/min，表面有机械划伤(见图 9a)；表面微观损伤大，表面粗糙度差，如图 10a 和图 11。当抛光液 pH 值为 9、10 和 11 时，抛光的化学作用和机械作用相当，材料去除率相差不大，表面质量也相差不大。当抛光液 pH 值为 11 时的表面质量最好，如图 9c 和图 10c，表面粗糙度 S_a 最优为 1.94 nm。

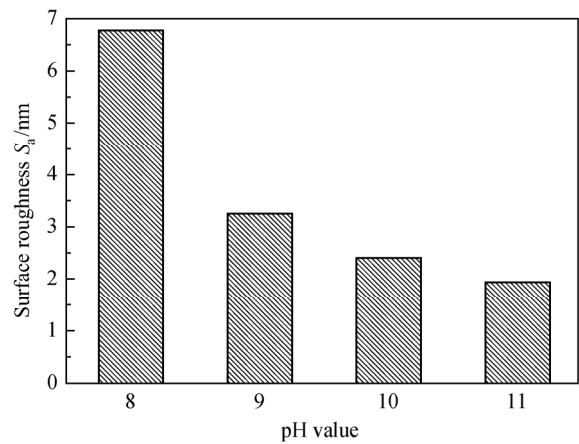


图 11 不同 pH 值抛光液固结磨料抛光后的晶体表面粗糙度
Fig. 11 Surface roughness of fixed abrasive polishing of LBO crystal with different pH values slurry

pH 值为 11 的抛光液固结磨料抛光 LBO 晶体材料去除率适中，表面损伤小于其他 pH 值的抛光液，表面粗糙度 S_a 最优为 1.94 nm，表面质量最好。

3 结 论

采用固结磨料抛光 LBO 晶体(110)面，选择酸性、中性和碱性 pH 值调节剂，研究不同调节剂及 pH 值抛光液对晶体抛光材料去除率和表面质量的影响，可得出以下结论。

1) 酸性抛光液对 LBO 晶体表面的腐蚀作用相对于机械作用太大；中性抛光液的腐蚀作用太小，抛光以机械作用为主，都不能获得高质量的晶体表面。碱性无磨料抛光液适合 LBO 晶体的抛光。

2) 碱性添加剂中，三乙胺活性强，抛光过程中化学作用强于机械作用；环己胺的活性弱，机械作用太大；乙二胺的活性适中。

3) 采用乙二胺配置抛光液 pH 值为 11 时，抛光后晶体表面质量最好。

4) 乙二胺配制 pH 值为 11 的碱性抛光液固结磨料抛光 LBO 晶体(110)面, 获得高晶体表面质量, 表面粗糙度 S_a 为 1.94 nm、表面损伤小。

志 谢: 感谢特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室(浙江工业大学)给予帮助。

参考文献:

- [1] HU Z G, WU Y C. Review of the research on the nonlinear optical crystal: LiB_3O_5 [J]. *Mater China*, 2010, 29(8): 12–17.
- [2] CHEN C T, WU Y C, JIANG A D, et al. New nonlinear-optical crystal: LiB_3O_5 [J]. *J Opt Soc Am B*, 1989, 15(6): 616–621.
- [3] 李军, 朱永伟, 左敦稳, 等. LBO 晶体的超精密加工工艺研究[J]. *功能材料*, 2008, 39(12): 2088–2090.
LI Jun, ZHU Yongwei, ZUO Dunwen, et al. *J Funct Mater (in Chinese)*, 2008, 39(12): 2088–2090.
- [4] WANG X, ZHANG X. Theoretical study on removal rate and surface roughness in grinding a RB-SiC mirror with a fixed abrasive [J]. *Appl Opt*, 2009, 48(5): 904–910.
- [5] LI J, GAO P, ZHU Y W, et al. Research on subsurface damage after abrasives and fixed-abrasive lapping of K9 glass [J]. *Key Eng Mater*, 2011, 487: 253–256.
- [6] CHEN Y H, TSAI T H, YEN S C. Acetic acid and phosphoric acid adding to improve tantalum chemical mechanical polishing in hydrogen peroxide-based slurry [J]. *Microelectron Eng*, 2010, 87(2): 174–179.
- [7] JEONG S, LEE H, CHO H, et al. Effect of additives for higher removal rate in lithium niobate chemical mechanical planarization [J]. *Appl Surf Sci*, 2010, 256(6): 1683–1688.
- [8] NAGAR M, VAES J, EIN-ELI Y. Potassium sorbate as an inhibitor in copper chemical mechanical planarization slurries. Part II: Effects of sorbate on chemical mechanical planarization performance [J]. *Electrochim Acta*, 2010, 55(8): 2810–2816.
- [9] WANG L, SONG Z, ZHONG M, et al. Mechanism of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ chemical mechanical polishing [J]. *Appl Surf Sci*, 2012, 258(12): 5185–5190.
- [10] WANG Y G, ZHANG L C, BIDDUT A. Chemical effect on the material removal rate in the CMP of silicon wafers [J]. *Wear*, 2011, 270(3/4): 312–316.
- [11] PEDDETI S, ONG P, LEUNISSEN L H A, et al. Chemical mechanical polishing of Ge using colloidal silica particles and H_2O_2 [J]. *Electrochem Solid-State Lett*, 2011, 14(7): H254–H257.
- [12] 宋晓岚, 刘宏燕, 杨海平, 等. 纳米 SiO_2 浆料中半导体硅片的化学机械抛光速率及抛光机理[J]. *硅酸盐学报*, 2008, 36(08): 1187–1194.
SONG Xiaolan, LIU Hongyan, YANG Haiping, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2008, 36(08): 1187–1194.
- [13] 陈志刚, 陈杨, 隆仁伟. 包覆型 $\text{CeO}_2/\text{SiO}_2$ 和 CeO_2 /聚苯乙烯复合磨料的制备及其化学机械抛光[J]. *硅酸盐学报*, 2009, 37(11): 1880–1885.
CHEN Zhigang, CHEN Yang, LONG Renwei. *J Chin Ceram Soc*, 2009, 37(11): 1880–1885.
- [14] 张晓强, 刘玉岭, 王辰伟, 等. 磷酸和酒石酸在 GSI 阻挡层 CMP 抛光液中的应用[J]. *半导体技术*, 2012, 37(3): 188–191.
ZHANG Xiaoqiang, LIU Yuling, WANG Chenwei, et al. *Semicond Technol (in Chinese)*, 2012, 37(3): 188–191.
- [15] 刘宇宏, 董莹, 戴媛静, 等. 铜抛光液中缓蚀剂 5-氨基四唑(ATA)的作用机制研究[J]. *润滑与密封*, 2012, 37(5): 1–6.
LIU Yuhong, DONG Ying, DAI Yuanjing, et al. *Lubr Eng (in Chinese)*, 2012, 37(5): 1–6.
- [16] 李军, 朱永伟, 左敦稳, 等. $\text{NdY}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 透明陶瓷的超精密加工[J]. *硅酸盐学报*, 2008, 36(8): 1178–1182.
LI Jun, ZHU Yongwei, ZUO Dunwen, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2008, 36(8): 1178–1182.
- [17] LI J, ZHU Y W, ZUO D W, et al. Influence of pH on material removal rate and surface roughness of super precision polishing of LBO crystal [C]//4th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies. Chengdu, China. 2009: 728209(1–5).
- [18] 李军, 朱镛, 陈创天. LBO 晶体超光滑表面抛光机理[J]. *人工晶体学报*, 2007, 36(1): 18–21.
LI Jun, ZHU Yong, CHNE Chuangtian. *J Synth Cryst (in Chinese)*, 2007, 36(1): 18–21.
- [19] LI J, ZHU Y W, ZUO D W, et al. Fixed abrasive lapping and polishing of hard brittle materials [J]. *Key Eng Mater*, 2010, 426–427: 589–592.
- [20] 林魁, 朱永伟, 李军, 等. 金刚石固结磨料研磨 K9 玻璃的研究[J]. *硅酸盐通报*, 2010, 29(1): 6–11.
LIN Kui, ZHU Yongwei, LI Jun, et al. *Bull Chin Ceram Soc (in Chinese)*, 2010, 29(1): 6–11.
- [21] LI J, ZHU Y W, ZUO D W, et al. Optimization of polishing with Taguchi method for LBO crystal in CMP[J]. *J Mater Sci Technol*, 2009, 25(5): 703–707.

WWW.CNKI.NET