

文章编号: 1001-3806(2012)01-0019-03

新型激光加热基座生长法生长氧化锆单晶光纤

王楠楠 王高* 李仰军 王小燕 赵辉

(中北大学 电子测试技术国家重点实验室,太原 030051)

摘要: 为了拉制氧化锆单晶光纤,采用一种基于激光加热基座生长法的单晶光纤拉制系统,在原有的激光加热基座生长法生长单晶光纤的基础上,设计出环形聚焦激光加热系统,对其光学系统进行了改进、优化。利用椭球镜的双焦点特性设计光路,在其第一焦点处形成聚焦环形热源,用于熔化晶棒,拉制光纤;通过 ZEMAX 光学软件对系统进行了光学仿真。结果表明,在光学系统的聚焦点,能形成高质量的环形热源。该系统有着其它激光加热基座生长法的光学系统无法比拟的优点,在拉制氧化锆和其它高温单晶光纤方面有着很好的应用。

关键词: 激光技术;激光加热基座生长法;环形激光加热系统;椭球反光镜;氧化锆单晶光纤

中图分类号: TN249 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.01.006

Zirconia single crystal fiber generation based on new laser heating pedestal growth

WANG Nan-nan, WANG Gao, LI Yang-jun, WANG Xiao-yan, ZHAO Hui

(National Key Laboratory For Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to produce zirconia crystal optical fibers, a pulling single crystal fiber system was put forward based on the method of laser heating pedestal growth (LHPG). Based on original LHPG, a circular focused laser heating system was designed and its optical system was improved and optimized. Making use of both focal points in an ellipsoidal mirror, a focused circular heating source was formed at one of the focal points to melt the crystal and produce fibers. Optical simulation was carried out with ZEMAX software. The simulation results indicate that a high quality circular heating source can be formed at the focal point of the optical system. The system has incomparable advantages comparing with other laser pedestal heating optical systems. The system has good application in the production of zirconia and other high temperature single-crystal optical fibers.

Key words: laser technique; laser heating pedestal growth; circular laser heating system; ellipsoidal reflector; zirconia single crystal fiber

引言

温度是冶金、化工、热处理、铸造、耐火炉窑、电力、航空航天等领域广泛需要测试的基本参量之一。目前,国内外接触式高温测试(800℃~2000℃)普遍采用高温热电偶和钨铼热电偶,基本满足了各个领域的需求。然而随着研究技术的不断深入,许多测试场合如军事应用中新武器的爆炸威力、作用性能评估迫切需要研究超过2000℃的高温传感器。高温单晶光纤通常需要在高温、腐蚀性气氛等恶劣环境中工作,因此需要它在比一般光纤宽得多的工作温度范围(室温~2000℃或更高)内具有良好的光传输特性、热稳定性、化学稳定性和机械强度。光纤材料和生长方法是影响

高温单晶光纤品质的主要因素。

氧化锆的熔点为2715℃、密度为5.89g/cm³、热膨胀系数为9.6×10⁻⁶/K、导热系数为(2.5~2.9)W/(m·K),具有高硬度、高强度、高韧性、极高的耐磨性及耐化学腐蚀性等优良的物化性能。在研究传统激光加热基座生长法(laser heated pedestal growth, LHPG)^[1]生长单晶光纤的基础上,作者把生长单晶光纤系统的两束激光源改进为可以实现稳定的可控制的环形热源^[2-3],它的研制成功不但能拉制氧化锆单晶光纤,并且对以后拉制熔点更高光纤有着重要的指导意义,为新型高温传感器^[4]的研究提供了坚实基础。

1 系统设计

整个环形聚焦激光加热系统^[5]的核心是光学系统设计。图1中给出了本课题组拉制氧化锆(ZrO₂)单晶光纤设计的光学系统。系统中1为CO₂激光器、2为激光扩束镜、3为He-Ne激光指向器、4为反射透

作者简介:王楠楠(1983-),男,硕士研究生,主要研究方向为光机电集成技术、仪器测量等。

* 通讯联系人。E-mail: wanggao@nuc.edu.cn

收稿日期:2011-03-07;收到修改稿日期:2011-06-03

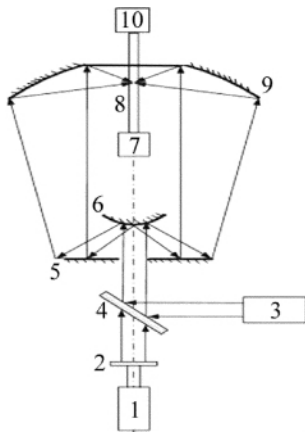


Fig. 1 Zirconia single crystal fiber preparation system

射镜、5 为平面反射镜、6 为球面反射镜、7 和 10 为步进电机控制部分、8 为源棒、9 为椭球反射镜。

功率为 500W 的 CO_2 激光器发射出 CO_2 激光束经扩束并通过中间留有小孔的平面反光镜后反射到凸面反光镜上,该光束经过凸面反光镜的反射把平行光束按设计要求照射到平面反光镜上,再通过平面反光镜反射到椭球反光镜上,利用椭球反光镜的光学特性由一个焦点上投射到椭球面上的任一光线,经反射后,必定会无球差地通过另一焦点。由于 CO_2 激光器和椭球反光镜的参量都可知,根据参量可以精确计算出平面反射镜和凸面反射镜的大小、位置、曲率中心等数据。目的是将 CO_2 激光器发出的光经过系统后全部均匀的照射到椭球反光镜的内壁上,最后再汇聚到共轭焦点处形成稳定环形热源。平面反射镜的中间开有圆孔,为了使其 CO_2 激光能完全入射到凸面反射镜上,其圆孔大小正好是经过扩束后的 CO_2 激光光束直径的大小。 He-Ne 激光器在系统中的功能是起光线准直的作用。

整个光学系统的各种反射镜都镀有对 CO_2 激光高反射率的金属膜,因此激光的利用率很高。系统在椭球反光镜的第一焦点上形成环形热源,保持激光功率的输出,也就形成了单晶光纤生长的熔区。在熔区,激光从四面对晶棒进行环形加热,使之熔化,将籽晶点入熔区向上拉起,控制好速度就会拉制成单晶光纤。

图 2 介绍了其机械系统,将夹具 7 和夹具 10 通过两根金属细杆固定到两个步进电机 11 上,步进电机的上下运动将带动夹具 7 和夹具 10 的运动。将椭球反光镜 9 固定到金属圆环片 12 上,将凸面反射镜 6 固定到金属圆环片 13 上,将中间开孔的平面反射镜 5 固定到金属圆环片 14 上,激光从系统下面入射,经各个反光镜的反射后在椭球反光镜 9 的第二焦点处形成环形热源。由于金属圆环和杆都采用硒化锌材料,对 CO_2 激光具有透过功能,所以对光路不产生影响。

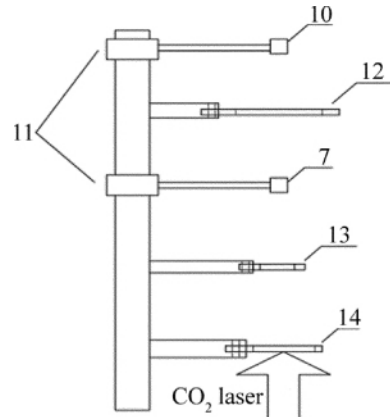


Fig. 2 Mechanical system

2 光学仿真

通过光学设计软件 ZEMAX 可以对其光学系统进行精确的仿真。图 3、图 4 是其光学仿真图。

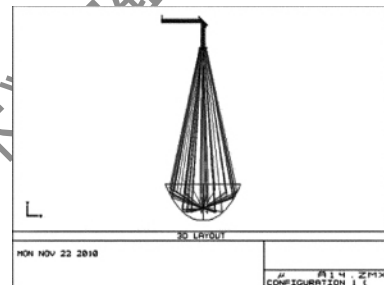


Fig. 3 Optical system

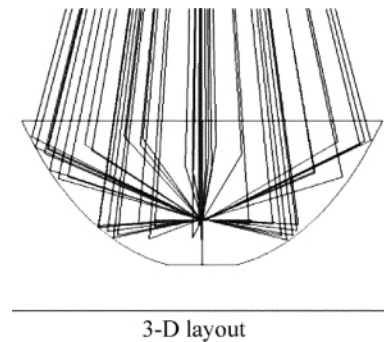


Fig. 4 Circular laser heating system

通过图 3、图 4 可以看到,此光学系统成像效果很好,在汇聚点能形成高质量的圆环,并且激光在系统传输过程中,能量损失很小。图 5 是用灰度值显示成像效果。

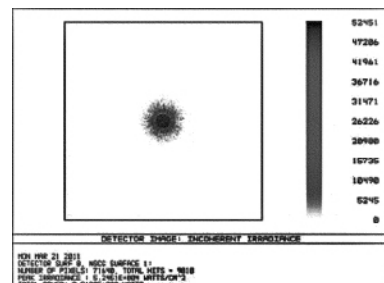


Fig. 5 Grayscale value indicating imaging effect

从图中可以看出,90% 的激光能量集中在一个直径小于 0.01mm 的圆斑内,能量利用率很高。通过

ZEMAX 软件的光学仿真,作者验证了此光学系统的科学合理性。

3 单晶光纤的直径控制

在 LHGP 法中,单晶光纤生长原理如图 6 所示。

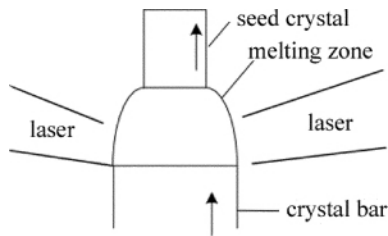


Fig. 6 Crystal fiber growth schemes

用 CO_2 激光束加热源棒使之溶化,待熔区稳定后将籽晶点入熔区,当籽晶向上拉时,就会长出晶纤。由于激光聚焦点位置恒定,所以必须同时将源棒以一定的速度向上传送。拉制单晶光纤时籽晶和源棒由两个步进电机控制,由于质量守恒,只要控制好其速度比稳定,就能拉制出直径稳定的单晶光纤。当熔区稳定时,由于质量守恒,晶纤直径为:

$$D_f = \sqrt{v_s/v_f} \cdot D_s \quad (1)$$

式中 v_s 和 v_f 分别为源棒和籽晶的速度; D_s 和 D_f 分别为源棒和籽晶的直径。对于一定直径的棒源,控制不同的籽晶拉速和棒源升速之比就可以得到不同直径的晶纤。在籽晶提拉速度恒定下,设晶体密度为 ρ ,根据固液面的能量守恒方程得:

$$v_f = [4(Q_s - Q_j)/(\rho\pi L)] \cdot D_f^{-2} = C \cdot D_f^{-2} \quad (2)$$

式中 Q_s 为热损耗, Q_j 为激光加热功率, L 为单位质量晶体的结晶潜热。一般生长过程中,激光加热功率 Q_j 和热损耗 Q_s 保持恒定,对同一种晶体 L 和 ρ 不变,所以 C 为一个跟晶体相关的常数。当热损耗 Q_s 恒定时,激光加热功率 Q_j 及生长速率 v_f 的增大都可以使晶纤直径减小。一般控制激光功率使其保持稳定,通过改变籽晶拉速和源棒的提升速度,就可以控制单晶光纤的直径。生长速度越大,得到的晶纤直径越小,如图 7 所示。

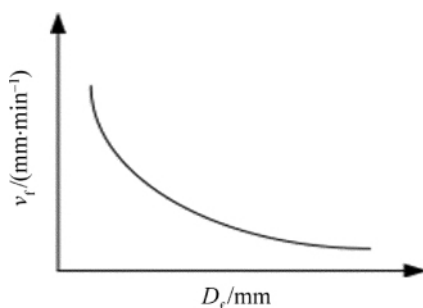


Fig. 7 Relationship between growth rate and fiber diameter

为了研究 $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ 单晶光纤的生长规律^[6-11],确定晶纤光学性质与生长条件的关系及最佳生长条

件,对其进行分析:生长速度过大会导致熔区的不稳定,因而增大光纤的直径波动;生长速度小则有利于光纤的稳定生长;但实际上,由于其它种种原因(如加热功率漂移、材料挥发),生长速度太慢反而会使光纤直径波动增大,且表面附着物增多。从这一方面考虑,对于 $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ 单晶光纤,比较适宜的生长速率是 $(4 \sim 20) \text{ mm/min}$ 。

4 小结

对基于激光加热基座法的单晶光纤控制系统进行了设计、仿真,并验证了系统的优越性。跟以往的激光加热基座系统相比,此光学系统是环形加热系统,使得源棒受热均匀,熔区比较稳定,且具有加热温度均匀、热能利用率高等特点。系统简化了单晶光纤的拉制系统,省略了晶棒的旋转系统,使拉制系统只有晶棒的给进系统和拉伸系统,从而使得系统更为简便,并容易控制。它的研制成功对拉制高熔点单晶光纤有着重要的意义。

参 考 文 献

- [1] BOULLON G, ITO M, GOUTAUDIER C, *et al.* Advances in growth of fiber crystal by the LHGP technique. Application to the optimization of Yb^{3+} -doped CaF_2 laser crystals [J]. *Journal of Crystal Growth* 2006, 292(1): 230-235.
- [2] DENG S H, TAO X Y, LIU M P, *et al.* Thermal analysis of metal ablation by means of femto second-to-nanosecond laser pulses [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(1): 4-7 (in Chinese).
- [3] YU Y, NIU Y X, WANG X Sh, *et al.* Numerical simulation of steady-state thermal blooming about high power laser [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(2): 182-184 (in Chinese).
- [4] ZHANG Y B, PICKRELL G R, QI B, *et al.* Single-crystal sapphire based optical polarimetric sensor for high temperature measurement [J]. *Sensors*, 2006, 6(8): 823-834.
- [5] STANDIFER E, PARK M, MAXWELL G, *et al.* Multi-beam optical after heater for laser heated pedestal growth: US 2009/0020069 A1 [P]. 2009-01-22.
- [6] TONG L M. Growth of high-quality $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ single-crystal optical fibers for ultra-high-temperature fiber-optic sensors [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2000, 217(4): 281-286.
- [7] SHUR J W, LEE H J, YOON D H. Near-stoichiometric $\text{LiNbO}_3\text{:ZrO}_2$ single crystal growth by micro pulling down method [J]. *Crystal Research and Technology* 2010, 45(2): 115-118.
- [8] GU J G, SHEN Y H, CHEN Sh Y. Molten zone controlling technique of single crystal fiber by means of LHGP [J]. *Materials Science and Engineering* 2001, 19(4): 20-23 (in Chinese).
- [9] LU Z H, CHEN J Q, CHEN X F, *et al.* Characteristics of single crystal fiber growth [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 1989, 18(4): 293-297 (in Chinese).
- [10] LU Z H, CHEN J Q, CHEN X F, *et al.* Conditions and controls of the growth of single crystal fibers [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 1989, 18(2): 154-159 (in Chinese).
- [11] SHEN Y H, WANG Y Q, YE L H *et al.* Study on the laser-heated miniature pedestal growth system with circular laser focusing [J]. *High Technology Letters*, 1994, 7(3): 16-18 (in Chinese).