

氧化锆单晶光纤制备系统设计与仿真

赵慧明, 赵辉, 王高, 李仰军
(中北大学信息与通信工程学院, 山西太原 030051)

摘要:单晶光纤是光纤高温传感器的关键器材,在航空航天、电力、铸造等的高温测试领域有着广泛应用。随着温度测试上限要求的不断提高($>2000\text{ }^{\circ}\text{C}$),常用的蓝宝石光纤高温传感器已无法满足该需求。本文针对这一现状,提出了一种基于LHPG法制备氧化锆单晶光纤的光学系统,旨在拉制出能测量更高温度的氧化锆单晶光纤,文章分析了该系统的基本结构、特点以及系统中主要参数的选择设置,并通过ZEMAX光学软件进行仿真。结果表明,该系统能够形成高质量的聚焦光斑,且具有对称性好、激光利用率高、能量分布均匀等优点,为成功拉制氧化锆及更高温单晶光纤提供了理论依据。

关键词:单晶光纤;氧化锆;激光加热基座法;ZEMAX仿真

中图分类号:TN201 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2012.03.019

Design and simulation of zirconia crystal optical fiber preparation system

ZHAO Hui-ming, ZHAO Hui, WANG Gao, LI Yang-jun

(College of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: As the key element of the gyrostats, the single crystal fiber has a wide application in the fields of aerospace, electricity and casting. For the upper limit of the tested temperature is continuously increasing ($>2000\text{ }^{\circ}\text{C}$), a optical system for preparing zirconia crystal optical fiber based on LHPG is proposed, which can prepare the zirconia crystal optical fiber to measure the higher temperature. The basic structure and characteristics of the system are introduced and the parameters of the system are analyzed. The system has been simulated through the ZEMAX optical software. The results show that the system meets the design requirements and it has the advantages of good symmetry, high efficiency, nice uniformity of energy distribution. This provides theoretical basis for the preparation of high temperature zirconium oxide single crystal optical fiber.

Key words: high temperature test; crystal fiber; LHPG method; ZEMAX optical software

1 引言

光纤高温传感器是一种新型的温度传感器,它是利用高温光纤进行辐射测量,具有高精度、高分辨率、抗电磁干扰等优点,超出了传统的高温传感器所能达到的测量极限,目前越来越多的应用在航空、材料、化学和能源工业等领域,发挥着不可替代的作用。蓝宝石光纤高温传感器是目前应用最多最为典型的一种光纤高温传感器,它的测温范围宽,灵敏度高,测量的极限温度达 $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$,常被应用于航空、航

天发动机燃烧室内气流温度的测量、中频电加热炉中温度的测量以及恶劣环境下瞬态表面高温的测量^[1]。

随着科技的不断发展,对温度测试上限的要求越来越高,如超然冲压发动机燃烧室温度、导弹前框

基金项目:山西省留学归国基金,晋留管办发[2010]14号,编号:76;太原市科技项目(No.201010-329)资助。

作者简介:赵慧明(1984-),女,在读硕士,主要研究方向为光电测试与计量技术。E-mail:356070675@qq.com

收稿日期:2011-08-24;修订日期:2011-09-06

瞬态温度,都已经远远超出了 2000 °C,是蓝宝石光纤高温传感器无法满足的,这对于光纤高温传感器的发展提出了更高的要求。高温单晶光纤是制作光纤高温传感器传感探头的理想材料,作为高温传感探头,它需要在高温(>2000 °C)腐蚀性气氛等恶劣环境中工作,且要具备良好的光传输特性、热稳定性、化学稳定性和机械强度,它的品质的好坏对于光纤高温传感器的性能有很大影响。因此,拉制出更高熔点的高温单晶光纤对于光纤高温传感器的发展有着重要的意义。

本文以拉制高熔点(2715 °C)的氧化锆为例,通过分析激光加热基座法的生长原理以及常见的两种光学系统的优缺点,提出了一种新的基于 LHPG 法生长氧化锆单晶光纤的光学系统,并通过 ZEMAX 对系统进行仿真,验证了该系统的优越性。

2 激光加热基座法

激光加热基座(LHPG)法,指激光熔融晶体棒后用籽晶提拉生长晶体光纤的一种方法。该方法始于 1975 年,80 年代初在美国成为研究热点。我国对 LHPG 法拉制晶体光纤的研究开始于 20 世纪 80 年代中期,主要研究单位有浙江大学和清华大学,1987 年浙江大学首次成功拉制出 Al_2O_3 和 YAG 两种晶体光纤,并做了大量深入的工作,将晶体光纤应用于高温传感器及光纤激光器^[2]。

LHPG 法的原理如图 1 所示,用激光束对源棒进行加热并使之熔化,待熔区稳定后将籽晶点入熔区,然后向上提拉籽晶晶纤随之长出。由于聚焦点位置保持不变,所以必须同时将源棒以一定速度向上传送。根据质量守恒,有关系式:

$$\frac{V_s}{V_f} = \left(\frac{D_f}{D_s}\right)^2$$

其中, V_s 为源棒送速; V_f 为籽晶拉速; D_f 、 D_s 分别为晶纤和源棒的直径。一般情况下, $V_f > V_s$ 即籽晶的提拉速度大于源棒的送速,生长的光纤比源棒细^[3]。

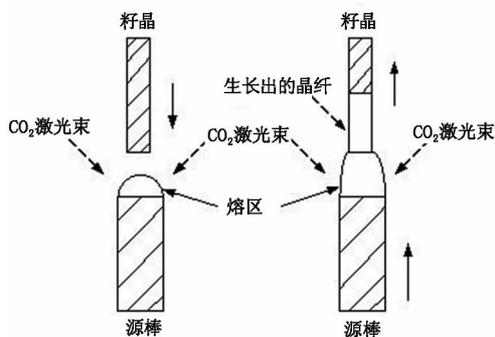


图 1 LHPG 法生长原理

根据经验,晶纤直径和源棒直径比满足:

$$\left(\frac{D_f}{D_s}\right) = \frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$$

将会得到优质的单晶光纤^[4]。

根据上述原理,目前主要有两种光学系统,一种是使用两台连续 CO_2 激光器发出的激光束,经过镀金反射镜和聚焦透镜后从两面入射到源棒处,使之熔融后,用籽晶拉制。该系统简单实用,但由于聚焦斑点较大(直径大于 0.3 mm),对称性差,对拉制细径的单晶光纤有一定困难^[5]。另一种如图 2 所示,是使用一台 CO_2 激光器,发出的激光束经准直后入射到一个相互匹配的双锥反射镜上,双锥反射镜将激光束扩展成一直径相对较大的空心光环束,光环束经反射镜,均匀对称地入射到抛物面聚焦镜上,形成环形聚焦热源,该系统克服了第一种系统的不足,聚焦精细,但光路结构复杂,操作不便,不易实现^[6]。

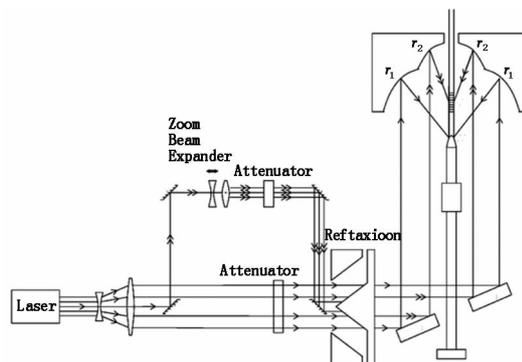


图 2 LHPG 法制备单晶光纤改进装置

3 基于 LHPG 法生长氧化锆单晶光纤系统设计

氧化锆(ZrO_2)是一种应用广泛的高温耐火材料,熔点为 2715 °C,化学稳定性好,对酸(除硫酸及氢氟酸外)、碱、碱熔体、玻璃熔体及熔融的金属都表现出极好的化学稳定性。因此,我们选择氧化锆作为在更高温度下代替蓝宝石($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)的试验材料,期望能在更高温度下代替 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 晶纤而满足光纤高温传感器的应用。

3.1 椭球反射镜的基本原理

在对氧化锆光纤制备系统进行设计时,要想在源棒的熔区上形成一个直径很小、对称性好、稳定均匀的聚焦光斑,本文采用了椭球反射镜来对光线进行汇聚。椭球反射镜是椭球的一部分,而椭球本身有一个很大的特性,即共轭焦点的特性。因此,椭球反射镜也具有同样的特性,它的汇聚原理如图 3 所示。 F_1 、 F_2 为椭球反射镜的两个焦点,根据几何关系可知,当有光线通过 F_2 入射到椭球反射镜的内表面时,经椭球内表面的反射后,肯定会汇聚于椭球反

射镜的另一个焦点 F_1 处,这就是它的共轭焦点特性。根据这一性质,就可以找到一个理想的聚焦热源。

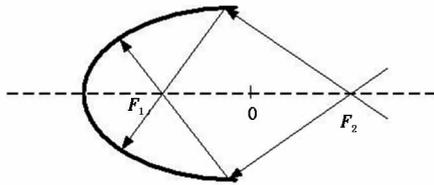


图3 椭球反射镜的汇聚原理图

3.2 系统的总体设计方案

光学系统的设计是整个制备系统核心,通过借鉴以往单晶光纤的制备系统,设计出如图4所示的系统结构,系统中1为 CO_2 激光器,2为准直透镜,3为凹面反射镜,4为椭球反射镜,5为源棒,6为籽晶,7和8为精密电机控制部分,9为固定平台。高功率 CO_2 激光器发出光束,经过准直透镜后平行入射到凹面反射镜上(凹面反射镜位于椭球反射镜的一个焦点上),光线经它反射后入射椭球反射镜上,利用椭球反射镜共轭焦点的特性,光线必然汇聚到椭球反射镜的另一焦点,此焦点处即为放置需要加热的源棒,将源棒固定在支架上,并由精密的控制电机控制。

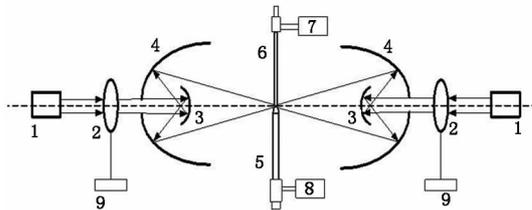


图4 氧化锆单晶光纤制备系统

3.3 系统中关键器件及主要参数的选取 椭球反射镜的具体参数,如图5所示。

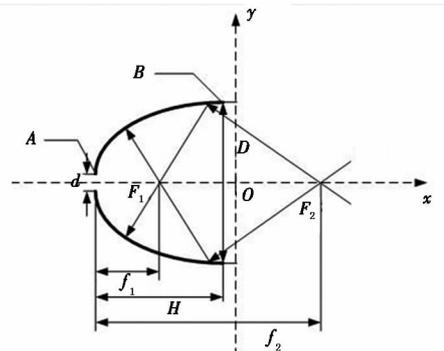


图5 椭球反射镜的具体参数图

第一焦距 $f_1 = 60 \text{ mm}$;第二焦距 $f_2 = 850 \text{ mm}$;反光镜有效包容角 $> 180^\circ$;反光镜直线放大倍率为 14.1;相对孔径为 1:1.85;定位孔径 $d = \Phi 67^{+0.2} \text{ mm}$;口径 $D_{\text{内}} = \Phi 365 \text{ mm}$, $D_{\text{外}} = \Phi 380 \text{ mm}$;

镜深 $h = 185 \text{ mm}$ 。其次,要对椭球反射镜进行镀膜,提高其反射率效率。

CO_2 激光器的选择,本实验采用美国相干公司 Diamond K-500 型 OEM 系统的 CO_2 激光器,光束发散角是 $(1.4 \pm 0.3) \text{ mrad}$,发出的光束波长为 $10.4 \sim 10.8 \mu\text{m}$,脉冲频率为 $0 \sim 100 \text{ kHz}$ 。准直透镜的使用主要是为了将光线以平行的方式射出。凹面反射镜的使用主要是为了光线以尽量大的角度入射到椭球反射镜上,同时又不能遮挡从椭球反射镜反射进行聚焦的光线,因此它的曲率半径和口径都要尽量的小。

4 氧化锆单晶光纤制备系统的软件仿真及结果分析

ZEMAX 光学设计软件分为序列模式和非序列模式两种:序列模式光线只能追迹一次,可以确定光斑的大小,对所成的像进行具体的分析;非序列模式可以多次对光线进行追迹,从而确定能量的利用率,看光线聚集处能量是否能够使氧化锆材料熔化。因此,本文先利用序列模式对光学结构进行仿真,然后根据序列模式的数据进行非序列仿真。

利用 ZEMAX,首先对波长、入瞳直径、视场以及镜头数据的设置,然后观察它的光线像差图和光程图,得到最优结果。在输入系统各透镜的初始数据参数,系统有严重的球差、色差、像差等现象,形成的光斑是发散的,直径也是很大的,与设计的目的有很大的出入。因此要对其中的数据进行修改,以矫正系统存在的不足。在进行修改时,主要保证了凹面反射镜和成像面处于椭球反射镜的两个焦点位置处,对其他的数据进行修改。修改后的结果分析如图6所示,此时的结构形成的光斑直径很小,光线的利用率也达到 90% 以上。

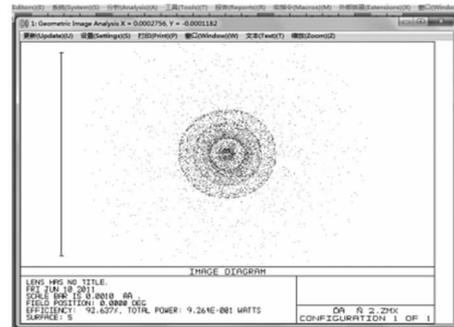


图6 几何像分析图

从图6所示的几何像分析图可知,对光线能量的利用率已达到了 92.637%,损失较小。大部分光线都聚集在中心区域,光斑直径为 0.02 mm 。

根据序列模式所确定的各种透镜的参数,可将其应用于非序列模式的仿真。非序列模式中是根据

各个物体的空间位置来进行仿真的,可得到系统的 NSC 3D 图与阴影图,如图 7、图 8 所示。对光线进行追迹,跟踪结束后,在像面上采集到了光束汇聚后得到的光斑,如图 9 所示。

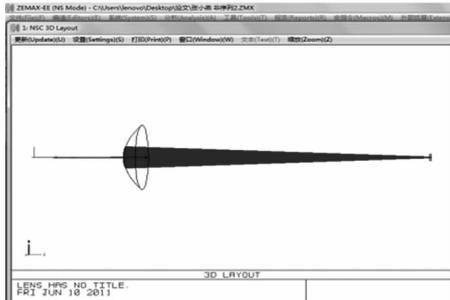


图 7 NSC 3D 绘图

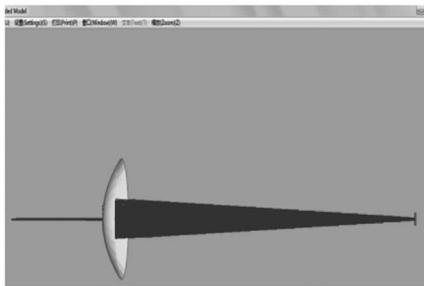


图 8 NSC 阴影模型

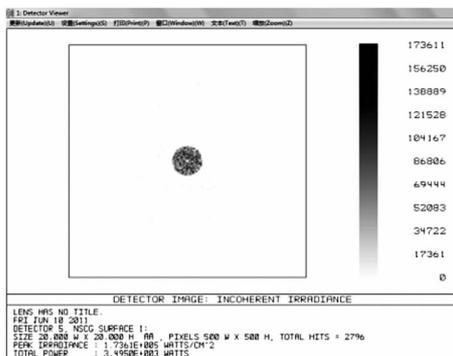


图 9 追迹多次的光斑图

光线汇聚后的光斑图质量较高,进行一次采集时,在 498.75 W 处 1 cm^2 的功率为 52083 W;进行多次采集后,光斑的能量分布较均匀,能量的损失较小。

5 结论

由 ZEMAX 仿真结果可以看出,本文提出的拉制氧化锆单晶光纤的光学系统,汇聚的光斑直径为 0.02 mm,且对称性好,激光利用率高,能量分布均匀可达到熔融氧化锆所需的能量,能够拉制出细径

优质的单晶光纤。同时,该系统结构简单,易于实现。

参考文献:

- [1] Hao Xiaojian, Li Kejie, Zhou Hanchang. Research on characteristic parameter of sapphire fiber blackbody cavity transient high temperature sensor measurement system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29 (10): 2122 - 2124. (in Chinese)
郝晓剑,李科杰,周汉昌.蓝宝石光纤黑体腔瞬态高温传感器测量系统特性参数研究[J].仪器仪表学报, 2008, 29(10): 2122 - 2124.
- [2] Yi Yongqing, Wang Dongbo, Liang Xiaohong, et al. Study of high-concentration Tm^{3+} -doped optical fibers using high-temperature vapor-phase technique [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(3): 264 - 267. (in Chinese)
衣永青,王东波,梁小红,等.高温气相掺杂法制备高掺铥石英光纤[J].激光与红外, 2010, 40(3): 264 - 267.
- [3] Ye Linhua, Yan Jianshe, Chen Jiqin. Growth of YVO_4 Crystal Fiber Using LHPG Technique [J]. Journal of Synthetic Crystals, 1996, 25(2): 118 - 121. (in Chinese)
叶林华,严建设,陈继勤.激光加热基座(LHPG)法生长 YVO_4 晶纤[J].人工晶体学报, 1996, 25(2): 118 - 121.
- [4] Gu Juguan, Shen Yonghang, Chen Shuying. Molten zone controlling technique of single crystal fiber by means of LHPG growth [J]. Materials Science & Engineering, 2001, 19(4): 21 - 23. (in Chinese)
顾菊观,沈永行,陈曙英,等. LHPG 法单晶光纤生长中的熔区控制技术[J].材料科学与工程, 2001, 19(4): 21 - 23.
- [5] Shen Yonghang, Wang Yanqi, Ding Zuchang. Study on the laser-heated miniature pedestal growth system with circular laser focusing [J]. High Technology Communication, 1994, 7: 16 - 17. (in Chinese)
沈永行,王彦起,丁祖昌.用 LHPG 法生长晶体光纤的环形聚焦激光加热系统研究[J].高技术通信, 1994, 7: 16 - 17.
- [6] Eugene Standifer, Menlo Park, Gisele Maxwell, et al. MuLi-beam optical afterheater for laser heater pedestal growth: US, US2009/0020069 A1 [P].