

· 光电器件与材料 ·

## 基于LHPG法的单晶光纤生长技术研究

赵慧明, 李仰军, 王 高, 赵 辉

(中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

**摘要:**单晶光纤作为高温传感器的关键器件在航空航天、军事研究、电力、铸造等方面有着广泛的应用。文中介绍了一种基于激光基座加热法的单晶光纤拉制系统,并通过ZEMAX光学软件对系统进行了光学仿真。软件仿真结果表明,在光学系统的聚焦点,能形成高质量的环形热源,验证了系统的优越性。为了拉出高质量的单晶光纤,对光学系统的熔区建立数学模型,并从理论分析上讨论了各种因素对单晶光纤品质的影响。由于系统有着其他激光基座加热法的光学系统无法比拟的优点,在拉制氧化锆和其他高温单晶光纤方面有着很好的应用。

**关键词:**单晶光纤;LHPG法;激光加热系统

中图分类号:TN383<sup>+</sup>.5;TN253

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2011)05-0021-03

## Single Crystal Fiber Growth Technology Based on LHPG Method

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

(Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement of Chinese Ministry of Education North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** As the key element of the high-temperature sensor, the single crystal fiber has a wide application in the fields of the aerospace, military, electricity and casting. A single crystal fiber drawing system based on the base heating method is proposed. This system is simulated by ZEMAX optical software. The simulation result shows that the high quality ring heat source can be formed in the focus point of the optical system. In order to draw the high-quality single crystal fiber, the mathematical models of the molten zone in the optical system is established and the influences of varies factors on the single crystal fiber are analyzed theoretically. The advantages of the system are incomparable for other optical systems, so it is used widely in zirconia drawing and other high-temperature single crystal fibers.

**Key words:** single crystal fiber; LHPG method; laser heating system

温度是冶金、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,是实现安全生产、质量控制与保证的基础。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<sup>[1]</sup>。然而随着研究技术的不断深入,许多测试场合迫切需要研究超过2000℃的高温传感器。瞬态高温场测量在多

种科学领域中,都占有非常重要的地位,越来越引起人们的重视,快速、准确测温技术愈加显得重要<sup>[2,3]</sup>。其关键是要有适合高温测试的传感器材料。高温光纤传感器其探头是耐高温单晶光纤,其材料的熔点决定了传感器测温的范围及极限。文中介绍了一种拉制单晶光纤的系统,即基于激光加热基座法的单晶光纤生长系统。并对系统进行了仿真、分析、实

收稿日期:2011-08-04

基金项目:山西省留学归国基金及太原市科技项目资助(201010-329)

作者简介:赵慧明(1984-),女,山西运城人,硕士研究生,主要研究方向为光电检测技术。

验,目的是拉制出高质量的单晶光纤。

### 1 光学系统及光学仿真

目前激光加热基座法(LHPG)是国内外生长单晶光纤的一种通用方法,是指用激光热熔晶体棒后用籽晶提拉生长晶纤<sup>[4]</sup>。采用抛物镜形成激光环形加热系统生长单晶光纤,图1为其光学原理图。

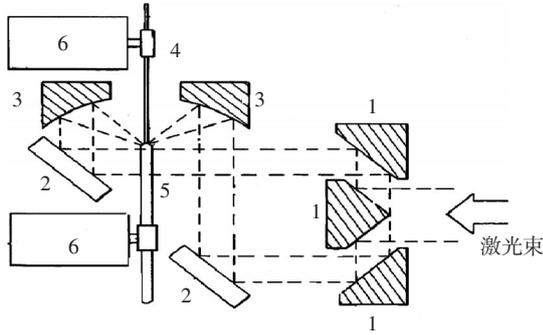


图1 LHPG法单晶光纤生长原理图

CO<sub>2</sub>激光束入射到一组相互匹配的锥形反射镜1上,经锥形反射镜反射形成两束相同激光光束,再经反射镜2反射,垂直入射到抛物面聚焦镜3上,并均匀地汇聚于聚焦镜的焦点,在焦点上形成环形热源<sup>[5,6]</sup>。图中4、5分别为源棒和晶纤。

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2是其光学仿真图。

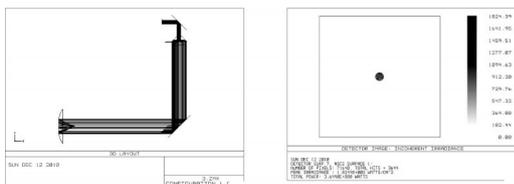


图2 ZEMAX仿真结果

通过图2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。右面的图是用灰度值显示成像效果,从图2中可以看出,90%的激光能量集中在一个直径小于0.01 mm的圆斑内,能量利用率很高。通过ZEMAX软件的光学仿真,验证了此光学系统的科学性。

### 2 晶纤形状的稳定性的

已拉制好的晶纤应该具有很好的品质,要达到

制做温度传感器的要求,就要求晶纤的形状要有很好的稳定性。研究晶纤形状稳定的各种要素,建立合适的生长熔区,保持激光功率和生长速度的稳定对晶纤的品质及其重要<sup>[7,8]</sup>。建立如图3所示的数学模型。

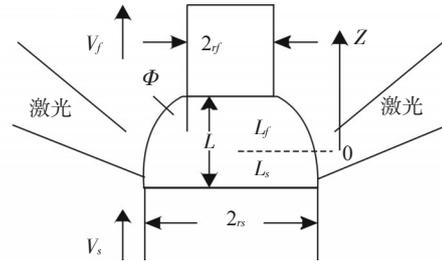


图3 数学模型

设晶纤生长方向为Z,加热激光束聚焦Z=0位置,熔区长度为L=L<sub>f</sub>+L<sub>s</sub>,r<sub>f</sub>和r<sub>s</sub>分别为晶纤和源棒的半径,v<sub>f</sub>和v<sub>s</sub>分别为其上升的速度,φ为其生长角(熔区表面和晶纤轴的夹角),初始状态下,晶纤稳定生长

$$\cos \varphi = \cos \varphi_0 \cong \frac{\sigma_{SG}^2 + \sigma_{LG}^2 - \sigma_{SL}^2}{2\sigma_{SG} \cdot \sigma_{LG}} \quad (1)$$

其中,σ<sub>SG</sub>、σ<sub>LG</sub>、σ<sub>SL</sub>分别为晶体(S)、熔体(L)及周围空气(G)的界面张力。当稳定生长受到干扰时,生长角发生变化,晶纤半径也发生变化,由图3可知

$$r_f = v_f \cdot \tan(\Delta\varphi) \quad (2)$$

假设溶液密度为e1,将式(2)对时间求导,求得晶纤半径r变化的微分方程为

$$\frac{\partial r}{\partial t} - \frac{\partial \varphi}{\partial r} \cdot \frac{\partial(\Delta r)}{\partial r} + 2 \cdot \frac{\rho_s}{\rho_l} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial v} \cdot r_0 \cdot \Delta r = g(\tau) \quad (3)$$

$$\text{其中, } g(\tau) = \frac{1}{r_0} \left[ L \cdot \left( \frac{\partial \varphi}{\partial L} \right) \cdot \delta L + \left( r_s \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial r_s} \right) \cdot \delta r_s + \right. \\ \left. r_0^2 \cdot \frac{\rho_s}{\rho_l} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial v} \cdot (\delta v_s - \delta v_f + 2\delta r_s) \right]$$

$$L = \frac{l}{r_s}, \delta A = \frac{A - A_0}{A_0} = \frac{\Delta A}{A_0}, (A = L, r_s, v_s, \dots) \quad (4)$$

g(τ)的形式决定于熔区、生长速度及源棒的变化<sup>[9,10]</sup>。

(1) g(τ)=0,即激光加热功率和晶纤生长速度等都保持恒定,式(3)与有阻尼的自由振动方程相似,其通解为

$$\Delta r(\tau) = \Delta r(0)e^{-\Gamma\tau} \cos(\Omega\tau - \phi) \quad (5)$$

$$\Gamma = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial r} \quad (6)$$

$$\Omega = \left[ 2 \cdot \frac{\rho_s}{\rho_l} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial v} \cdot r - \frac{1}{4} \left( \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

其中,  $T$  和  $Q$  分别为生长系统的阻尼系数和振动频率, 晶纤稳定生长要求  $T \geq 0$ ,  $T=0$  时对应于稳定生长的极限值。求解方程得出熔区的变化长度与直径比的关系。

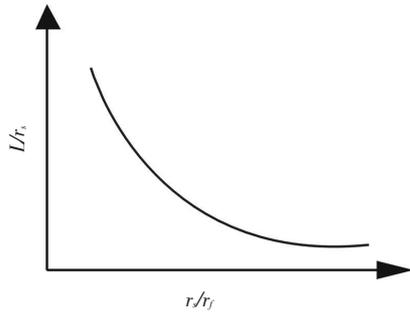


图4 熔区变化长度与直径比的关系

从图4中可以看出,在  $r/r_0$  相同的情况下,表面张力越大,允许稳定生长的最长熔区长度越长;半径减小比越大,临界熔区长度就越短,晶纤生长越困难<sup>[11,12]</sup>。

(2)  $g(\tau) \neq 0$ , 即激光加热功率和生长速度不稳定情况

假设这种不稳定因素来自周期性的有规律扰动,假设  $g(t) = g(0)\sin \omega t$ , 则(3)式与强迫阻尼振动相似,其解为

$$\Delta r = \frac{g(0)}{\sqrt{\left[ 1 - \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right]^2 + 2\xi \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2}} \cdot \cos(\omega t - \alpha - \phi) \quad (8)$$

式(8)表明,周期性干扰下,晶纤半径的波动幅度跟扰动幅度  $g(0)$  及扰动频率都有关系。设一放大因子  $M$  表示  $g(0)=1$  时晶纤半径波动的放大倍数。

$$M = \left\{ \left[ 1 - \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right]^2 + 2\xi \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (9)$$

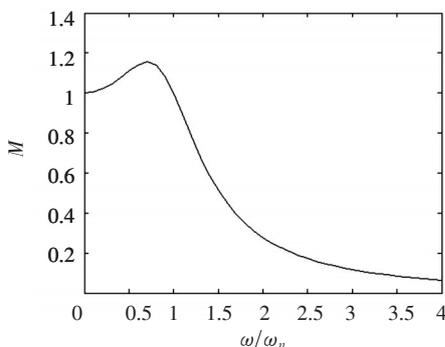


图5  $M$  与  $\omega/\omega_n$  的关系

用 MATLAB 对其仿真得到  $M - (\omega/\omega_n)$  的曲线图如图5。从图5中可以看出,当  $(\omega/\omega_n) \rightarrow 0$ ,  $M \rightarrow 1$ , 即低频干扰对晶纤直径波动的影响取决于扰动幅度  $g(0)$ ; 当  $(\omega/\omega_n) \rightarrow \infty$ ,  $M \rightarrow 0$ , 高频干扰对晶纤直径波动影响不大。可以假设对晶纤直径波动影响最大的频率为  $\omega_{max}$ , 其对应的最大放大因子为  $M_{max}$ , 则

$$\begin{aligned} \omega_{max} &= \sqrt{\Omega^2 - \Gamma^2} \\ M_{max} &= \frac{\Omega^2 - \Gamma^2}{2\Omega\Gamma} \end{aligned} \quad (10)$$

假如扰动是突变的情况下,可将其看成脉冲

$$g(\tau) = \delta(\tau), (\tau \rightarrow 0, \delta(\tau) = 1) \quad (11)$$

代入式(8)可解得

$$\Delta r = \frac{g(0)}{\sqrt{1 - \xi^2}} \cdot e^{-\Gamma\tau} \cdot \sin\left(\sqrt{1 - \xi^2} \omega_n \tau\right) \quad (12)$$

可定义瞬时放大因子  $M(0)$

$$M(0) = \left( 1 - \xi^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \omega_0 \quad (13)$$

### 3 结论

从上述讨论得知,在周期或脉冲的扰动下,晶纤半径的抖动量与扰动振幅  $g(0)$  及  $\Gamma$  和  $\Omega$  有关,通过数字计算可以得出  $L$  与  $\Gamma$  和  $\Omega$  的关系,  $L$  减小,  $\Gamma$  和  $\Omega$  都会增大,使系统更加稳定,但此时的  $M_{max}$  也相应增大使得系统的抗干扰能力降低,所以生长单晶光纤时候要建立合适的熔区,减小激光功率及生长速率的扰动,保持其稳定运行,使得晶纤能稳定生长。

### 参考文献

- [1] 郝晓剑,周汉昌.蓝宝石光纤黑体腔高温计[J].应用基础与工程学报,2004(2):(2)18-222.
- [2] 李伟,郝晓剑,周汉昌.基于蓝宝石光纤的黑体腔瞬态高温传感器设计[J].光电技术应用,2010,25(5):54-57.
- [3] 吴路生.单晶光纤及其在激光技术中的应用[J].物理,1994(10):595.
- [4] 沈永行,王彦起,叶林华,等.用LHPG法生长晶体光纤的环形聚焦激光加热系统研究[J].高技术通讯,1994,7:16-18.
- [5] Eugene Standifer, Menlo Park, CA(US), et al. MuLi-Beam Optical Afterheater for Laser Heater Pedestal Growth:US, US2009/0020069 A1[P]. 2009-01-22.
- [6] 唐鼎元.激光加热基座法生长  $BaB_2O_4$  单晶纤维[J].人工晶体学报,1983,8(3).

(下转第67页)

值,进而对应出数模转换芯片的数字量,将这些数字量制表存储进单片机的存储空间。每个数字量代表的是一个输出点,这些数字量就用来描点逼近模拟正弦信号,当然,如果存储空间和数模转换芯片的速度允许的话,采样点数可以进一步的增加。

(2)根据 $f_0$ 和 $f_1$ 的频率,计算在各自频率下点与点之间的转换时间(也就是各个点的保持时间)。以100个点为例,保持时间分别为

$$T_{\text{hold1}}=1/f_0/100(\text{s}) \quad (2)$$

$$T_{\text{hold2}}=1/f_1/100(\text{s}) \quad (3)$$

(3)根据1200的波特率,计算各个符号也就是“1”或者“0”的持续时间,并结合第(2)步得出的时间算出每个符号应该发送的点数 $N_1$ 和 $N_0$ 。

$$N_1=1/1200/T_{\text{hold1}}(\text{个}) \quad (4)$$

$$N_0=1/1200/T_{\text{hold2}}(\text{个}) \quad (5)$$

(4)将“1”和“0”对应的数字量点数和各个点的持续时间制表存储,编制相应的程序,等待发送。例如:设“1”其对应的频率为 $f_1$ ,则发送“1”需要 $N_0$ 个第一步存贮的正弦值点(一个周期逐个点发送完毕后继续下一个周期的发送)。这样,编写单片机程序时,可以采用一个计数器用来记录发送的点数,另外采用一个定时器来保证一个点发送的时间 $T_{\text{hold2}}$ 。这样就完成了一个符号“1”的发送。同样,符号“0”的发送方法可以很容易得到。

(5)根据主板发送来的装备识别信息码和测试长度信息码,在相应的存储区间取出测试码序列,逐比特按照“1”和“0”对应的发送方法,进行数模转换。

## 4 结论

通过上面的方法和步骤,就可以产生2FSK信号,这种信号通过专用的二线口接口发送出去,就可以对被测设备进行相关的模拟和测试了。当然,上述步骤仅仅产生了一种特定模拟信号(2FSK信号),

对于其他信号虽然在信息格式上有所差异,但从原理上看,都是可以通过描点的方法进行模拟逼近的,所以上述方法是具有通用性的。在实际测量中,采用上述方法和步骤产生的模拟信号(比如2FSK信号)在测量对应的通信设备的时候,效果良好,进一步证实了本卡设计的合理性和正确性。

## 参考文献

- [1] Byungyang Ahn, A Study On a High-Speed Gaussian Random Number Generator, IEEE Asia Pacific conference On circuit and system, November 18- 21, 1996, Seoul, Korea.
  - [2] Dong-U lee, Wayne Luk,John-D villasenor ,Peter Y.K. Cheung ,A Gaussian Noise Generator for Hardware-Based Simulations, IEEE transactions on computers, 2004, (53): 1523-1533.
  - [3] 方再根. 计算机模拟和蒙特卡洛方法[M]. 北京: 北京工业学院出版社, 1988, 6.
  - [4] 张萍, 戴光明. 高斯随机噪声实时生成方法实现研究[J]. 电子技术应用, 2004, (4): 10-12.
  - [5] 尹中秋. 基带通信中常见噪声的产生方法研究[J]. 微机计算机信息, 2006, 22, (11).
  - [6] 尹中秋. 情报指挥控制系统中的误码率测试研究[D]. 2007, 3: 23-38.
  - [7] 王作斌, 张建民, 包国彬. PLD在数字信号处理系统中的应用[J]. 光电技术应用, 2005, 20(6): 43-45.
  - [8] 周强, 李世成, 耿晓蕾, 等. 一种新型任意波形发生器的设计[J]. 光电技术应用, 2006, 21(6): 42-44.
  - [9] 许珉, 郑文棋. 基于单片机的低压脉冲发生器研制[J]. 电力自动化设备, 2009, (3).
  - [10] 赵宏, 逢志刚. 80C196KC单片机的应用设计[J]. 光电技术应用, 2003, 18(4): 60-62.
  - [11] 包国彬, 张建民, 刘赢. 单片机复位电路的设计与分析[J]. 光电技术应用, 2005, 20(3): 66-69.
  - [12] 吴允平, 蔡声镇. 单片机程序的限时服务策略及设计[J]. 系统工程与电子技术, 2004, (11).
- 
- (上接第23页)
- [7] 卢予宏, 陈继勤, 陈溪芳, 等. 单晶光纤生长特性[J]. 人工晶体学报, 1989, 18(12): 293-297.
  - [8] 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): 20-23.
  - [9] 卢予宏, 赵先胜, 陈继勤, 等. 单晶光纤生长条件及控制[J]. 人工晶体学报, 1989, 18(6): 154-159.
  - [10] M Macatro, M Peres, C P L Rubinger. Structural and optical properties on thulium-doped LHPG-grown Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> fibers [J]. Microelectronics Journal, 2009, 40(2): 309-312.
  - [11] Jyh-Chen Chen, Chao-Chang Hu. Quantitative analysis of YIG, YFeO<sub>3</sub> and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> in LHPG-grown YIG rods[J]. Journal of Crystal Growth, 2003, 249(2): 245-250.
  - [12] 张松斌, 董纬豫, 童利民, 等. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>单晶光纤生长及光学特性[J]. 人工晶体学报, 1993, 22(2): 202-206.