

# 光纤阵列组件超声椭圆振动辅助抛光系统设计

余亦曦<sup>1</sup>, 刘德福<sup>1,2</sup>, 陈涛<sup>1</sup>, 严日明<sup>1</sup>

(1. 中南大学机电工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 高性能复杂制造国家重点实验室, 湖南长沙 410083)

**摘要:**针对现有化学机械抛光工艺难以满足光纤阵列组件高质量的要求, 该文根据压电陶瓷的逆压电效应及超声振动原理, 提出了一种夹心式模式转换型超声椭圆振动装置, 用以提高光纤阵列组件端面的抛光质量。设计了用于光纤阵列组件超声椭圆振动辅助化学机械抛光的超声振动系统, 并对所设计的系统进行了有限元分析和测试试验。试验结果表明, 超声振动系统共振频率测试结果与设计结果误差小于5%, 超声椭圆振动双向振幅分别为4  $\mu\text{m}$  和2  $\mu\text{m}$ 。

**关键词:** 超声椭圆振动; 超声换能器; 光纤阵列组件; 有限元分析(FEA); 阻抗测试

**中图分类号:** TN384; TH16 **文献标识码:** A

## Design of Ultrasonic Elliptical Vibration Assisted Polishing System for Fiber Array Components

SHE Yixi<sup>1</sup>, LIU Defu<sup>1, 2</sup>, CHEN Tao<sup>1</sup>, YAN Riming<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering Central South University, Changsha 410083, China;

2. State Key Lab. of High Performance Complex Manufacturing, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The existing chemical mechanical polishing process is hard to meet the requirement of quality of fiber array components. Based on the inverse piezoelectric effect of piezoelectric ceramics and ultrasonic vibration principle, a kind of mode-conversion ultrasonic elliptical vibration device with sandwich transducer is presented for improving the quality of fiber array component surface polishing. A ultrasonic vibration system for chemical mechanical polishing was designed, and the FEM analysis and test for the designed system have been carried out. The results showed that the error of resonance frequency between test results and design results is less than 5%. The bidirectional amplitude of the ultrasonic elliptical vibration are 4  $\mu\text{m}$  and 2  $\mu\text{m}$  respectively.

**Key words:** ultrasonic elliptical vibration; ultrasonic transducer; fiber array component; FEA; impedance

### 0 引言

光纤阵列组件是集成光波导器件的重要组成部分, 它采用直接对接耦合与光电子芯片的光路相连接, 其端面制造质量直接影响光通信的质量<sup>[1]</sup>。目前, 光纤阵列组件的端面抛光主要是采用化学机械抛光(CMP)技术。化学机械抛光已被广泛应用于硬脆材料的超精密加工中<sup>[2-4]</sup>, 然而随着集成光电子器件的发展, 现有的化学机械抛光技术也难以满足光纤阵列组件高质量要求, 迫切需要寻找一种高精度、高效率、低成本的改进型化学机械抛光技术。

超声椭圆振动辅助加工技术在硬脆材料的加工方面有优势, 表现出许多优良的效果, 可提高工件的加工效率, 降低表面粗糙度, 提高加工精度<sup>[5-8]</sup>。若将超声椭圆振动用于化学机械抛光过程, 抛光效果

也得到了改善<sup>[9]</sup>。本文提出了一种模式转换圆盘型超声椭圆振动系统, 并对其进行了性能测试, 证实了模式转换圆盘型椭圆振动系统的可行性。

### 1 超声换能系统的设计

在超声椭圆振动辅助化学机械抛光实验系统设计中, 超声换能系统的性能尤为关键, 其作用是将高频电信号转换成超声频机械振动, 并将振幅进行放大。超声换能系统主要由超声发生器、超声换能器、超声变幅杆及工具头等部分构成。

本文采用模式转换型超声椭圆振动装置来实现光纤阵列组件的超声椭圆振动辅助化学机械抛光。纵向超声振动经过超声变幅杆放大后被传递到模式转换圆盘<sup>[10]</sup>。在纵向振动超声变幅杆的中心激励作用下, 模式转换圆盘自中心作轴对称弯曲振动, 圆

收稿日期: 2015-12-30

基金项目: 国家自然科学基金面上基金资助项目(51275534); 湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ2153)

作者简介: 余亦曦(1991-), 男, 湖南人, 硕士生, 主要从事精密制造的研究。通信作者: 刘德福(1971-), 男, 湖南人, 博士生导师, 主要从事精密制造的研究。

盘的弯曲振动传递到圆周位置即形成纵向和横向2个方向复合而成的椭圆振动。

### 1.1 超声换能器设计

纵向超声换能器通过将高频电信号加载到压电陶瓷上,使压电陶瓷产生高频伸缩振动,带动前、后盖板产生纵向机械振动,达到将高频电信号转换为超声机械振动的作用。

图1为纵向超声换能器结构示意图。图中, $l_0$ 为压电陶瓷片总厚度, $l_1$ 为后盖板长, $l_2$ 为前盖板长, $l_3$ 为电极片总厚度。

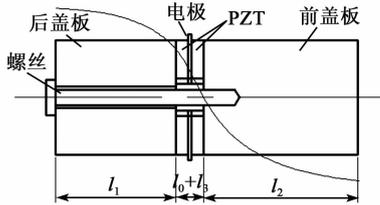


图1 纵向超声换能器结构简图

超声换能器的设计采用半波长非对称结构设计,换能器前、后端面处于纵向振动波峰位置,振动位移最大,压电陶瓷组与前盖板交接位置处于纵向振动节点位置,振幅为0。因此, $l_2$ 为相应材料中纵波波长的1/4,后盖板、压电陶瓷组的总长( $l_0 + l_1 + l_3$ )为相应材料中纵波波长的1/4,即

$$l_2 = \frac{c_2}{4f} \quad (1)$$

式中: $f$ 为纵向超声换能器共振频率; $c$ 为材料的声波速度。

根据频率方程可计算 $l_1$ <sup>[11]</sup>,即

$$\tan\left(\frac{\omega l_1}{c_1}\right) = \frac{Z_0}{Z_1} \left[ T - \frac{T + \tan\left(\frac{\omega l_2}{2c_2}\right)^2}{T + \left(\frac{Z_3}{Z_0}\right) \cot\left(\frac{\omega l_3}{c_3}\right)} \right] \quad (2)$$

其中

$$T = \cot\left(\frac{\omega l_0}{c_0}\right) - \frac{c_0(k_{33})^2}{\omega l_0} \quad (3)$$

$$Z_n = \rho_n c_n S_n \quad (4)$$

式中: $\omega$ 为系统振动的圆频率; $k_{33}$ 为压电陶瓷纵向机电耦合系数; $n$ 为超声换能器各个部分, $n=0,1,2,3$ ;  $Z_n$ 为各部分材料的阻抗特性; $\rho_n$ 为各部分材料密度; $c_n$ 为各部分材料的声波速度; $l$ 为各部分结构的总厚度; $S$ 为各部分的截面积。

根据选定的 $l_0, l_3$ 即可解得纵向超声换能器共振频率 $f$ 与其 $l_2, l_1$ 间的关系。

### 1.2 超声变幅杆设计

图2为超声变幅杆结构示意图。超声变幅杆的设计采用半波长圆锥形变幅杆结构设计,即变幅杆

2个端面处于2个相位相差180°的波峰位置,超声变幅杆中存在一个振动幅度为0的节点位置,利用这个节点位置可放置法兰盘用于固定整套装置。

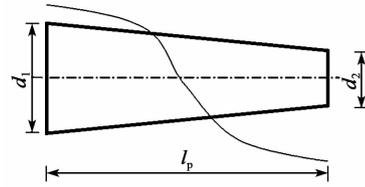


图2 圆锥形变幅杆结构简图

计算超声变幅杆共振长度 $l_p$ 的频率方程为

$$\tan\left(\frac{\omega l_p}{c}\right) = \frac{\omega l_p}{c + \frac{c^3 N}{(d_1/d_2 - 1)^2 (\omega l_p)^2}} \quad (5)$$

式中: $d_1$ 为变幅杆大端直径; $d_2$ 为变幅杆小端直径; $N=d_1/d_2$ 为面积系数。

### 1.3 模式转换圆盘设计

模式转换圆盘是超声椭圆振动系统的核心部件,在超声变幅杆的中心激励作用下,模式转换圆盘自中心作轴对称弯曲振动,圆盘的弯曲振动传递到圆周位置即形成纵向和横向2个方向上的椭圆振动。模式转换圆盘的振幅随着厚度的减小而增加,且只有当圆盘的厚度半径之比小于1/5时,圆盘振动为弯曲振动<sup>[12]</sup>。因此,需综合考虑圆盘厚度、直径、共振频率及振动阶次之间的关系,设计模式转换圆盘的参数。

图3为模式转换圆盘结构示意图。圆盘中心点及圆周位置处于振动波峰位置,圆盘中心点与圆周间存在若干个振幅为0的节圆。

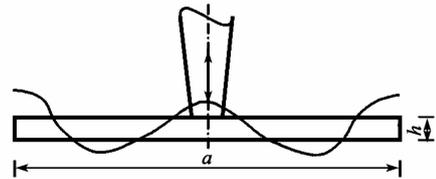


图3 模式转换圆盘结构示意图

模式转换圆盘的振动方程<sup>[13]</sup>为

$$\frac{J_0(\mu_t)}{J_1(\mu_t)} + \frac{I_0(\mu_t)}{I_1(\mu_t)} = \frac{2(1-\sigma)}{\mu_n} \quad (6)$$

式中: $\sigma$ 为圆盘材料的泊松比; $J_0(\mu_t)$ 、 $I_0(\mu_t)$ 、 $J_1(\mu_t)$ 、 $I_1(\mu_t)$ 为贝塞尔函数。

由式(6)可知,当给定一个确定的泊松比值后,可得一系列的 $\mu_t$ 值, $t$ 值表示圆盘弯曲振动的阶次,即振动时圆盘中节圆的个数。

第 $n$ 阶模式转换圆盘对应的频率式为

$$f_n = \frac{\mu_t^2}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\sigma^2)}} \quad (7)$$

式中: $f_n$ 为模式转换圆盘取第 $n$ 阶振动模态时的共

振频率;  $E$  为模式转换圆盘弹性模量;  $h$  为模式转换圆盘厚度;  $a$  为模式转换圆盘直径。

由式(7)可得圆盘厚度、直径、共振频率与阶次间的关系,从中选取合适的参数即可得所需模式转换圆盘的参数。

超声换能系统设计过程中,首先需选定各部分材料和初始尺寸参数,然后对超声换能器、变幅杆和模式转换圆盘等关键部件进行参数设计。本文中  $l_0=12\text{ mm}$ ,直径  $d_1=40\text{ mm}$ ,材料为 PZT-8,换能器前、后盖板、变幅杆及模式转换圆盘的材料为 6061 铝合金,  $l_3=1\text{ mm}$ ,材料为铜,相关材料参数如表 1 所示,设计频率为 38 000 Hz,根据上述计算过程得到一组超声换能系统参数如表 2 所示。

表 1 超声椭圆振动装置材料参数

材料参数	PZT-8	6061 铝	铜
密度/(kg/m <sup>3</sup> )	7 600	2 700	8 900
弹性模量/GPa	90.1	69.0	110.0
泊松比	0.33	0.33	0.37
声速/(m/s)	4 500	5 070	3 750
$k_3$	0.64	—	—

表 2 超声椭圆振动装置尺寸参数

$l_1/\text{mm}$	$l_2/\text{mm}$	$l_p/\text{mm}$	$d_2/\text{mm}$	$h/\text{mm}$	$a/\text{mm}$
22.5	33.5	76.5	16	4	96

## 2 超声换能系统的有限元分析

根据超声换能系统尺寸参数,建立分析模型,并进行模态分析,结果得到多个共振频率,其中频率为 36 577 Hz 的振型中换能器、变幅杆为纵向振动,圆盘为弯曲振动。振型符合设计目的,满足设计要求。模态分析结果与设计频率 38 000 Hz 产生误差的主要原因是,在设计过程中忽略了预紧力螺栓、螺栓孔、压电陶瓷中心孔及螺栓预紧力等对共振频率的影响。

图 4 为对超声换能系统进行谐响应分析得到位移-频率曲线。谐响应分析的最大响应点即为系统共振点。当系统输入电信号频率与系统共振点频率均为 36.6 kHz 时,谐共振响应值最大,可证明系统处于共振状态,振幅最大。

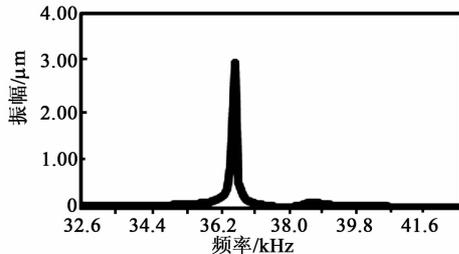


图 4 谐响应分析变化曲线

## 3 超声换能系统验证与测试

图 5 为设计的超声换能系统。超声换能系统通过法兰盘及螺栓连接在夹具上。对超声换能系统进行阻抗分析和振幅测量,可验证前述设计和分析是否正确。

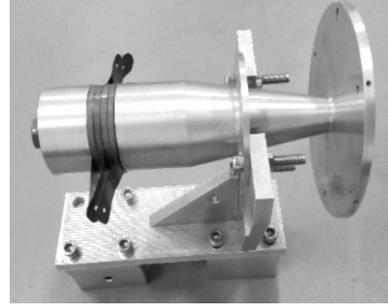


图 5 超声椭圆振动装置实物装配图

### 3.1 阻抗分析

利用 PV70A 型超声阻抗分析仪对所设计的超声换能系统的共振频率进行了测试,得到导纳圆图(图中  $G$  为导纳实部,  $B$  为导纳虚部)和共振曲线分别如图 6、7 所示。阻抗测试得到共振频率  $f_s$  为 36 552 Hz,最大阻抗频率  $f_p$  为 36 990 Hz,与有限元分析结果相吻合。

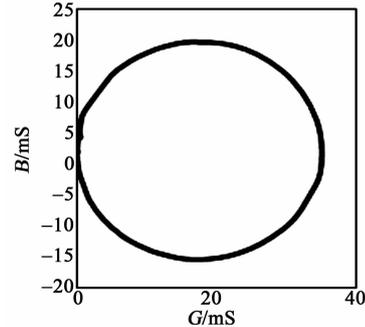


图 6 导纳圆图

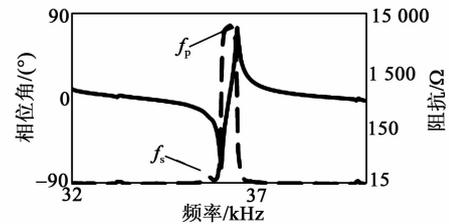


图 7 共振曲线

### 3.2 模式转换圆盘的振幅测试

采用日本基恩士公司 LK-G5000 型激光高精度激光位移传感器对超声换能系统中模式转换圆盘的底面边缘位置进行纵、横向的振动位移测试,得到的振动轨迹曲线如图 8(a)、(b)所示。其中,圆盘边缘纵

向振动峰-峰值达  $8\ \mu\text{m}$ , 横向振动峰-峰值达  $4\ \mu\text{m}$ 。将纵、横向振动轨迹合成后得到椭圆振动轨迹图像如图 8(c) 所示。测试结果表明, 本文设计的超声振动系统存在纵、横向并存的椭圆振动, 满足设计要求。

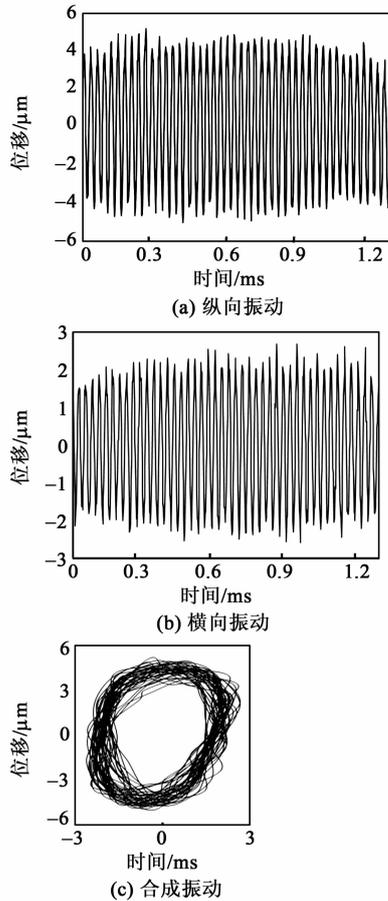


图 8 振动位移

#### 4 结论

1) 设计了由纵振超声换能器、变幅杆和模式转换圆盘组成的超声椭圆振动系统。

2) 利用有限元分析软件对超声椭圆振动系统进行了模态分析和谐响应分析。系统振动频率为  $36\ 577\ \text{Hz}$  时, 换能器及变幅杆为纵振模态; 模式转换圆盘为弯曲模态, 满足设计要求。

3) 对超声椭圆振动系统进行阻抗分析得到系统共振频率为  $36\ 552\ \text{Hz}$ , 进行振幅测试得到纵向振幅  $4\ \mu\text{m}$ , 横向振幅  $2\ \mu\text{m}$ , 满足实际应用需求。

#### 参考文献:

[1] 王铭杰. 平面光波导与光纤阵列的耦合封装研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.  
 [2] 蒋建忠, 袁晓林, 赵永武. CMP 材料去除机制的研究进展[J]. 润滑与密封, 2011(5): 101-105.

JIANG Jianzhong, YUAN Xiaolin, ZHAO Yongwu. Recent progress in study on the material removal mechanisms during chemical mechanical polishing[J]. Lubrication Engineering, 2011(5): 101-105.  
 [3] 熊伟, 储向峰, 白林山, 等. GaN 基 LED 衬底材料化学机械抛光研究进展[J]. 表面技术, 2014(1): 125-130.  
 XIONG Wei, CHU Xiang-feng, BAI Lin-shan, et al. Research Progress of Chemical Mechanical Polishing of Substrates Used in GaN-based LED[J]. Surface Technology, 2014(1): 125-130.  
 [4] 彭进, 夏琳, 邹文俊. 化学机械抛光液的发展现状与研究方向[J]. 表面技术, 2012, 41(4): 95-98.  
 PENG Jin, XIA Lin, ZOU Wenjun. Research status and prospect of chemical mechanical polishing slurry [J]. Surface Technology, 2012, 41(4): 95-98.  
 [5] TSAI M, YANG W. Combined ultrasonic vibration and chemical mechanical polishing of copper substrates [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 53(1): 69-76.  
 [6] XU W, LU X, PAN G, et al. Ultrasonic flexural vibration assisted chemical mechanical polishing for sapphire substrate[J]. Applied Surface Science, 2010, 256(12): 3936-3940.  
 [7] 唐军, 赵波. 超声波椭圆振动加工技术的研究进展[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2014(1): 70-78.  
 TANG Jun, ZHAO Bo. Developments of ultrasonic elliptical vibration machining[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2014(1): 70-78.  
 [8] 罗傲梅, 郭伟. 纵-扭复合振动超声深滚加工表面强化研究[J]. 表面技术, 2015(5): 106-110.  
 LUO Aomei, GUO Wei. Research on surface strengthening by ultrasonic deep rolling with longitudinal-torsional vibration [J]. Surface Technology, 2015(5): 106-110.  
 [9] YING W, WU Y, KATO M. A new approach to silicon wafer edge treatment by ultrasonically assisted polishing (UAP)[J]. International Journal of Materials & Product Technology, 2008(31): 159-175.  
 [10] 马立. 超声抛光原理研究及超声系统设计[D]. 苏州: 苏州大学, 2010.  
 [11] 曹凤国. 超声加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.  
 [12] 马玉平, 陈明, 袁艳玲, 等. 弯曲振动圆盘几何尺寸与振动特性关系的研究[J]. 机械工程师, 2003(10): 9-12.  
 MA Yuping, CHEN Ming, YUAN Yanling, et al. Study on the experiments of relationship between the geometric dimensions of flexural vibration disk and its vibration characteristics [J]. Mechanical Engineer, 2003(10): 9-12.  
 [13] 袁艳玲, 马玉平, 王得胜. 弯曲振动圆盘振动参数设计方法[J]. 机械工程师, 2004(10): 46-48.  
 YUAN Yanling, MA Yuping, WANG Desheng. Designing method about vibration parameters of flexural vibration disk[J]. Mechanical Engineer, 2004(10): 46-48.