

文章编号 1004-924X(2010)11-2362-07

光纤端面的断裂机理及制备方法

李殿军,李世明,孟范江

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室,吉林 长春 130033)

摘要:为从理论和试验两个方面解决光纤端面制备问题,根据固体断裂力学原理,分析和讨论了脆性均匀固体物质的断裂过程,得到了圆柱形物质在某一点的断裂路径具有在裂纹发展方向上的稳定性和唯一性的结论,并据此提出了一种简便的制备光纤端面的设想。根据该设想,设计了一个光纤切割装置并进行了光纤端面制备的试验。在试验过程中,分别对光纤芯径为 0.2,0.3,0.6,0.8,1 mm 的光纤端面进行了切割,并应用读数显微镜和可见激光传输光束显示等技术手段测试了制备的光纤端面的光学质量。实验结果显示,制备的光纤端面质量完全满足实际应用的要求,质量完好的概率达到 100%。

关键词:格里菲斯裂纹;光纤端面;光纤切割;固体断裂

中图分类号: TN25 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101811.2362

Fracture mechanism of fiber terminal-faces and their fabrication

LI Dian-jun, LI Shi-ming, MENG Fan-jiang

(*State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

Abstract: To study and fabricate the fiber terminal-faces in both theory and experiment, the fracture principle of a brittle uniform solid material is analyzed and discussed concretely according to the solid fracture mechanics. It is concluded that the fracture route in a point of the columniform uniform solid material has the characteristics of stability and uniqueness in spreading trends. A simple fabricating method to cut the optical fiber terminal-faces is proposed, and an experiment device based on the method is developed. During the cutting experiments, the optical fiber terminal-faces are fabricated with different diameters of 0.2 mm, 0.3 mm, 0.6 mm, 0.8 mm and 1 mm. Then, a reading-microscope and visible laser transmission methods are adopted to measure the optical quality of the obtained fiber terminal-faces. The testing results show that the fiber terminal-faces fabricated by this method can well satisfy the practical application requirements and the probability of high quality for these fiber terminal-faces has reached 100%.

Key words: Griffith crack; fiber terminal-face; fiber cutting; solid fracture

收稿日期:2010-06-07;修订日期:2010-09-07.

基金项目:中国科学院知识创新工程资助项目

1 引 言

光纤应用的重要性可从 2009 年诺贝尔物理学奖颁给高锟以表彰其在光纤通信方面取得的成就可见一斑^[1]。现代科技发展已经不仅仅是把光纤当作一种灵活的传播介质,而是可以将光纤直接做成光源和器件使用^[2-6]。应用光导纤维,直接涉及光纤端面的制备问题,这是因为光纤端面的质量对光纤的实际应用效果有着极大的影响。除了球面、斜面、锥角等具有特殊要求的光纤端面外,应用最广泛的光纤端面是与光纤圆柱体垂直的平面,本文的有关讨论主要针对这种平面端面的制备问题。在相当多的应用场合下,特别是在传输激光能量的光纤领域中,如大功率光纤激光器光纤输出端头、医用激光光纤端头、光纤探测器端头等以光纤为能量传输介质的输出端经常由于接触污染物质导致损伤而需要重新制备端面。良好的平面端面可以通过专业的光学研磨方式获得,然而,绝大多数的光纤使用者皆不具备这种条件。因此,各行各业的光纤用户急需一种简便的非研磨光纤端面制备方式,如作者的工作就涉及大功率脉冲 Nd:YAG 激光光纤两个端头经常因损伤而需要重新制备的问题。

目前,光纤端面制备方面的论文鲜有报道,为解决这个困扰光纤使用者的实际问题,本文依据固体断裂力学原理,分析和研究了光纤端面的制备问题,并依据研究结果提出了一种光纤端面制备方案。该方案不需要使用研磨技术,而是通过垂直切割结合施加水平拉力的方式制备光纤端面。实验对于所制备的各种不同直径光纤端面进行了显微检测和可见光束的传播检验,证明光纤端面质量良好。从实际工程应用的角度来看,本文提出的制备方案从原理和实施方法两个方面完全解决了光纤端面的制备问题。光纤使用者在了解这种原理之后,即可以灵活地利用手中现有的合适工具自行切割光纤,也可以根据实际情况自制一个简单的切割装置,达到自行解决受损光纤端面的重新制备问题。

2 光纤端面制备理论分析

通常情况下,固体材料理论断裂强度 σ_m 由下式确定^[7]:

$$\sigma_m = \left(\frac{E\gamma}{d} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

式中 E 表示杨氏模量, γ 表示单位面积的表面能, d 表示原子间距。一般的脆性材料如硅、锗、玻璃、硒化锌等,实际显示的强度比按照公式(1)所预计的要低 1~3 个数量级,格里菲斯理论能够很好地解释这种现象:强度显著下降的原因是脆性固体断裂表面存在着微小裂纹,称为格里菲斯裂纹,它的作用如应力扩展器,会使局部应力扩大为总施加应力的 10 倍乃至 100 倍以上。实践证明,即使是经过良好抛光的光脆性材料,其表面也存在着各种微小的裂纹。为此,作者使用原子力显微镜检验了经过光学抛光的硒化锌晶体表面,如图 1 所示,整个任何区域内都存在着大小不同、深浅不一、方向各异的缺陷和裂纹。

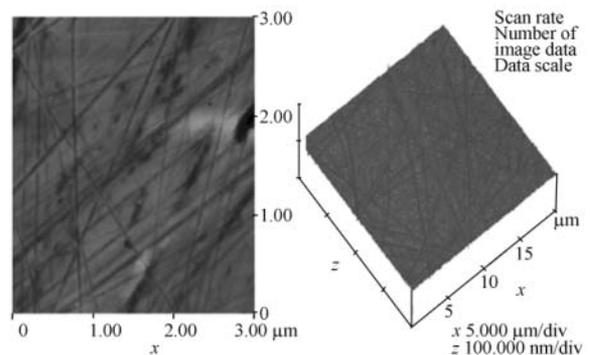


图 1 经过光学抛光的硒化锌晶体显微照片

ig. 1 Metallograph of ZnSe crystal by optical polishing

根据格里菲斯公式,脆性固体裂纹的传播临界张应力 σ_r 为

$$\sigma_r = \left(\frac{E\gamma}{r} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

式中 r 为格里菲斯裂纹长度。将裂纹断裂强度公式(2)和理论强度表达式(1)对比,可求出

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_r} = \left(\frac{r}{d} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

式(3)说明裂纹在其两端引起了应力集中,将外界应力放大了 $(r/d)^{1/2}$ 倍,使局部达到理论临界强度

而导致断裂。为直观地表示变化趋势,作者计算了理论断裂强度与试样裂纹尺寸的关系曲线,如图 2 所示,原子间距 $d=2 \times 10^{-10}$ m,一个长度 $r=2 \mu\text{m}$ 的裂纹即可将断裂强度降低到理论值的 1% 左右。裂纹的存在使得玻璃纤维在张力作用下相当脆弱,因此,实用的光导纤维都在其芯径外皮包裹了厚度为几十微米量级的塑料保护层,目的之一就是避免产生外界裂纹,提高强度;这个问题的反向思维即利用人为制造的裂纹可以促使光纤断裂。基于这个想法,作者提出光纤端面制备的基本构思。

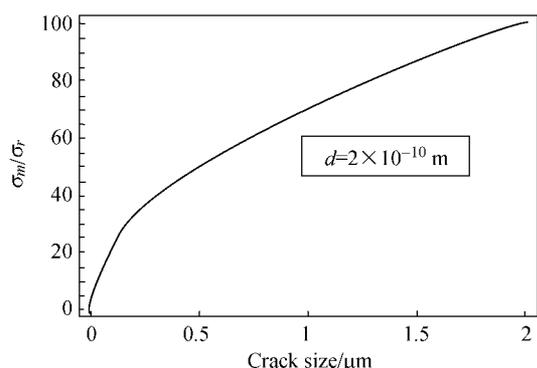


图 2 理论断裂强度与裂纹尺寸的关系曲线

Fig. 2 Theoretical fracture intensity vs. crack size

根据玻璃断裂主要是由表面效应引起的事实,可以推断在玻璃纤维体某一部位上人为地制造出适当的裂纹,就可以有效地控制玻璃纤维的断裂位置。通常人为制造的裂纹尺度远大于图 2 所示范围,因此可以期望不用施加很大的应力就可以将光纤拉断。剩下的问题是如何有效地制造该裂纹及保证被切割端面沿着一个稳定的路径断裂。

在进行裂纹问题的应力分析之前,有必要区分裂纹位移的三种基本类型(见图 3),称为张开型(I型),滑开型(II型)和撕开型(III型)。在这三种类型中,第一种即张开型与固体裂纹的扩展关系最大,本文的讨论也仅限于与光纤端面切割有直接关系的张开型上。

以格里菲斯裂纹为基础建立的固体断裂力学理论给出了某一固体断裂的基本准则^[8]:

$$G = \frac{K^2}{E} = 2\gamma \quad (\text{平面应力}), \quad (5)$$

$$G = \frac{K^2(1-\nu^2)}{E} = 2\gamma \quad (\text{平面应变}), \quad (6)$$

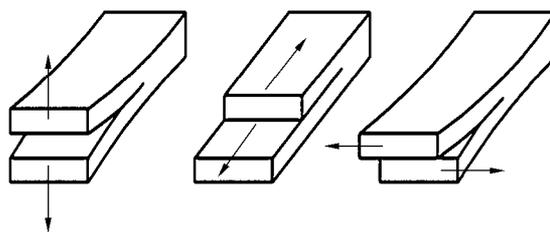


图 3 断裂的三种基本类型

Fig. 3 Three basic types of fracture

式中 G 表示应变能释放率, K 表示应变强度因子, E 表示杨氏模量, ν 表示泊松比, γ 表示与表面能项有关的广义表面张力,它代表了裂纹的阻力。一旦驱动力与阻力之间的平衡受到有利于前者的扰动,裂纹就开始扩张。这时合乎逻辑的假设是:在使系统总能量减少最快的方向上扩展是有利的,也就是说,对于各向同性裂纹系统,问题是要找到机械能释放率 G 的极大值方向。对于任意选取的一个包含特征尺寸为 r 的静态裂纹系统,在纯 I 型加载作用下应变强度因子 K_I (下标 I 表示纯 I 型加载) 和应力 σ 在各方向上分量 σ_{ij} 的标准关系如下^[9]:

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sin\left(\frac{3\alpha}{2}\right)\right], \quad (7)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \left[1 + \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sin\left(\frac{3\alpha}{2}\right)\right], \quad (8)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos\left(\frac{3\alpha}{2}\right), \quad (9)$$

$$\sigma_{xz} = \nu'(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}), \quad (10)$$

$$\sigma_{yz} = \sigma_{zx} = 0. \quad (11)$$

式中 α 为特征尺寸 r 的裂纹长度方向与直角坐标系中的坐标轴夹角。为找出裂纹 r 断裂路径的方向,需要考虑在施加载荷情况下该裂纹的增量 Δr 沿着与自身平面偏转一个角度扩展的可能性,如图 4 所示。在图 4 所选坐标系条件下,只需处理两种特殊情况(第三种情况是绕 OY 轴旋转,但这并不使裂纹面方向发生变化)就够了:裂纹面绕 OZ 轴旋转一个 θ 角(图 4a)和裂纹面绕 OX 轴旋转一个 ϕ 角(图 4b)。对于图 4 中的裂纹增量 Δr 按 θ 方向旋转形成的新的平面,经过变换可以得到该平面上有关正应力和剪应力分量(以下只列

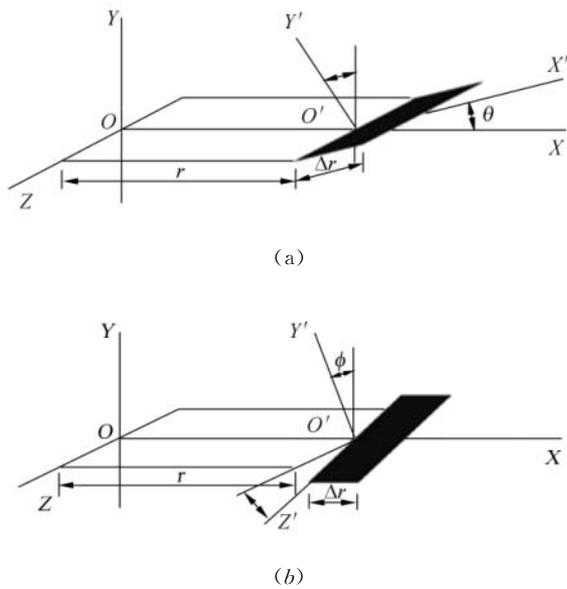


图 4 裂纹扩展模型

Fig. 4 Crack spreading model

出与计算有关的表达式):

$$\sigma_{y'y'} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad (12)$$

$$\sigma_{x'y'} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right). \quad (13)$$

$$\sigma_{z'z'} = 0. \quad (14)$$

在有外加纯 I 型载荷作用下,通过断裂力学分析法^[10]可以得到裂纹位移方向应变能释放率 G 随着 θ 角的变化表达式:

$$G(\theta) = \frac{2\pi r \sigma_{y'y'}^2 (1-\nu^2)}{E} + \frac{2\pi r \sigma_{x'y'}^2 (1-\nu^2)}{E}, \quad (15)$$

同样,对于图 4 中的裂纹增量 Δr 按 ϕ 方向旋转形成的新的平面,经过类似的变换也可以得到其应变能释放率 G 随着 ϕ 角的变化表达式 $G(\phi)$:

$$G(\phi) = \frac{2\pi r \sigma_{y'y'}^2 (1-\nu^2)}{E} + \frac{2\pi r \sigma_{x'y'}^2 (1-\nu^2)}{E}. \quad (16)$$

为清楚地表示出函数 G 的变化情况,作者应用数学软件 Mathematica5.2 将函数 $G(\theta)$ 和 $G(\phi)$ 用沿自身平面扩展的 $G(0)$ 值归一化后,表示在图 5 中。从图 5 中可以看出,函数 G 在 $\theta=0$ 和 $\phi=0$ 时有极大值,说明裂纹总是趋向于沿自身平面继续扩展。因此,可以得出这样的结论:在合适应力作用下,I 型平面裂纹断裂具有方向上的稳定性。这个结论是重要的,因为对于一个均匀的断裂系统而言,该结论说明加载时断裂面的发展路径在

方向上是稳定的和唯一的。根据以上理论结果可以推出,对于一个光导纤维即玻璃圆柱体而言,沿着与圆柱体轴垂直的方向在其表面上人为地(如使用金刚石刀、尖锐砂轮片、玻璃刀等)刻划光纤表面制造出横向的裂纹,再沿着轴方向上均匀地施加一个足够大的纯 I 型张应力,可以期望玻璃圆柱体在刻划处断裂从而得到一个良好、唯一和稳定的断裂端面。

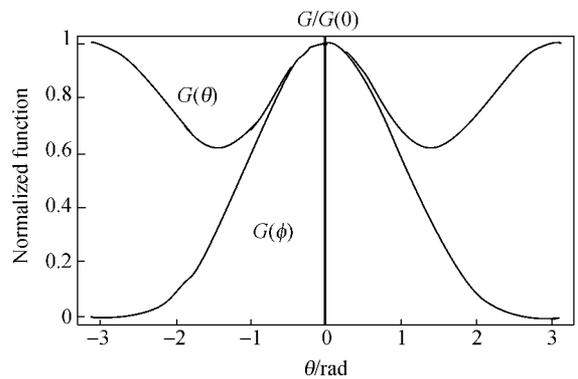


图 5 I 型裂纹扩展的归一化函数

Fig. 5 Normalized function of crack spreading model I

3 光纤切割实验和端面检验

根据上述光纤端面制备理论分析结果,设计了一个光导纤维端面的切割试验装置,以验证上述分析结论是否符合实际,同时证明所设计的光纤端面切割装置是否具有实用性。光纤切割试验装置的原理如图 6 所示。上述装置能够实现人为制造裂纹,施加纯 I 型张应力并完成逐渐增加张应力直至拉断光纤的整个操作过程。

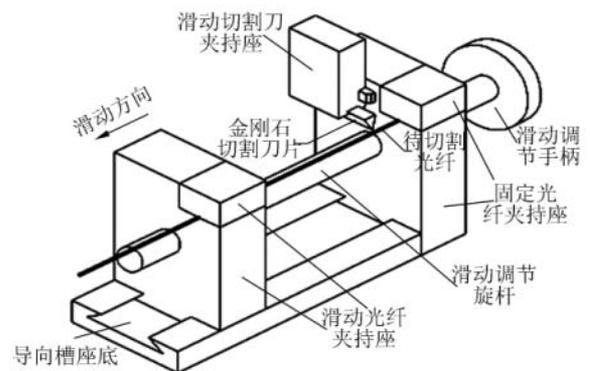


图 6 光纤切割试验装置示意图

Fig. 6 Diagram of cutting device for fiber terminal-face

光纤切割过程如下:首先把除去外包皮的光纤放入到两个光纤夹持座的凹槽内夹紧;然后滑动调节旋杆把光纤张紧到一个合适的程度,推动切割刀夹持座使之在待切割光纤上划过形成横向的裂纹;最后,再滑动调节手柄转动滑动调节旋杆进一步张紧光纤直至使其断裂。通过这一过程即可得到质量良好的光纤端面。实验中发现,在凹槽上附一层厚度为 2 mm 左右的海绵能有效地增加摩擦系数,有助于保护和夹紧光纤。光纤切割刀刃口外型最好为一薄片状的直径合适的半圆,半圆顶点与光纤轴中心在同一水平面上,这样就能保证切割时造成尺寸合适的裂纹。裂纹尺寸对于光纤切割是一个重要的参数,它直接影响光纤边缘的破损程度和所需施加张应力的

大小。由于试验当时没有 $\phi < 0.2$ mm 和 $\phi > 1$ mm 的光导纤维,因此仅用该装置切割了直径分别为 0.2, 0.3, 0.6, 0.8, 1 mm 共计 5 种不同规格的玻璃光导纤维,所以,本实验结果不能对超出这些规格的光纤端面切割的质量情况做出评价,但根据本文论述的光纤切割原理和使用本切割装置的实际经验推断,用这种方法可以切割直径小至 50 μ m 和大至 2 mm 左右的光导纤维。

在实验中,将切割的不同直径和光学质量的端面均放在 30 \times 读数显微镜下进行观察与检测,发现所有被切割端面几乎没有什么差别,共同特点是表面均匀,边缘无损伤,这个结果也说明采用本切割方法获得的光纤端面质量完好的概率达到 100%。图 7 显示的是随机选取的采用本切割方法获得的 $\phi 0.8$ mm 光纤切割端面(右侧)与用普通方法剪断的光纤端面(左侧)的显微照片,可以看出靠人肉眼几乎无法分辨出切割装置人为制造裂纹的部位所在之处,说明人为制造的裂纹足够小,没有影响到实际应用。由图 7 可看出,这两种光纤端面呈现的光学质量相差很大,特别是在边缘部位更为明显。

为进一步验证被切割光纤端面的光学质量,实验中还采用可见激光束通过光导纤维输出显示的办法检验了被切割光纤端面的光学质量,检测原理参见图 8。图 8 中被测的可见激光束在显示屏上的光斑输出图样参见图 9 的照片,图 9 中左侧的光斑为图 7 采用普通方法剪断的光纤输出的

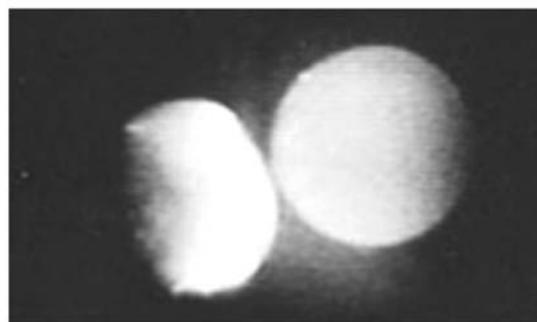
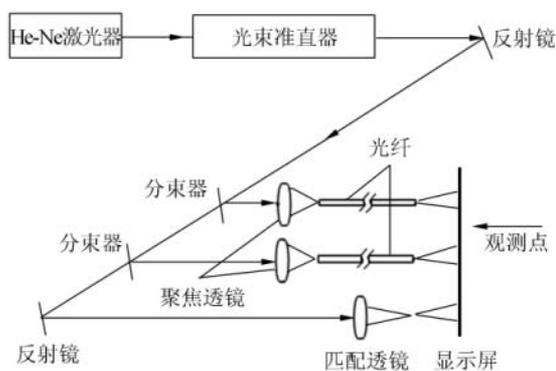


图 7 $\phi 0.8$ mm 光纤端面显微照片对比

Fig. 7 Comparison of fiber terminal-faces with a diameter of 0.8 mm (left; snapped fiber; right; fiber made by terminal-face cutting device)



8 由可见激光通过 $\phi 0.8$ mm 光纤端面检验端面质量

Fig. 8 Examining fiber terminal-faces with a diameter of 0.8 mm by visible laser

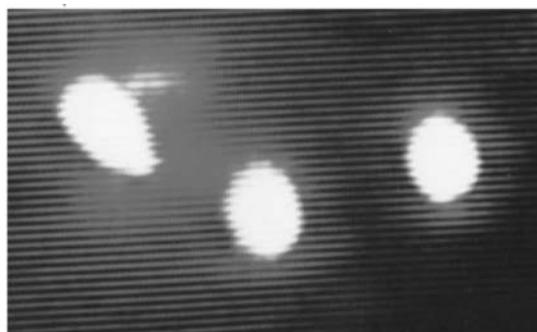


图 9 $\phi 0.8$ mm 光纤传输光束与直接照射光束比较

Fig. 9 Comparison of laser beam spots from $\phi 0.8$ mm fibers and direct laser beam (left; snapped fiber; mid; fiber made by terminal-face cutting device; right; direct beam display)

He-Ne 激光束,中间的光斑是采用本试验设备切

割的光纤输出的 He-Ne 激光束,右侧光斑为 He-Ne 激光直接照射到屏上的激光束,可以看出,采用普通方法切割的光纤端面输出为一个畸变的长条形的斑点(端面效应),而用本文提出的方法切割的光纤端面为一个规整的圆形分布,几乎与激光原光束所形成的光斑分布看不出有什么差别,这一事实说明本文提出的切割法可以切出质量满足光学要求的端面。

4 结 论

本文从固体断裂力学理论出发,分析与研究了脆性固体材料的断裂问题,特别是对圆柱形的

玻璃光导纤维材料的断裂特性进行了重点论述,得出了均匀介质裂纹的扩张与发展方向存在着稳定性和唯一性的结论。应用该结论,设计了一个简单的光纤切割装置,并对不同直径的光导纤维进行了端面制备实验,且应用显微照相和可见激光传输显示两种方法检验了制备的光纤端面质量。对不同直径(0.2,0.3,0.6,0.8 和 1 mm)光纤切割实验获得质量优良的光学端面的概率达到 100%,完全验证了本文理论分析结论的可靠性和正确性。因此,本文提出的方式方法不仅为生产厂商制造商用光纤切割装置提供了理论依据,也为广大光纤使用者自制简易光纤切割装置提供了技术手段。

参考文献:

- [1] 张静. 光纤之父高锟获诺贝尔奖[J]. 互联网周刊, 2009,(20):14-14.
ZHANG J. Gao kun achieved the nobel prize for the fiber researches[J]. *China Internet Weekly*, 2009, (20):14-14.
- [2] 张锦龙,王葵如,余重秀,等. 光纤环境在光栅传感调节系统中的应用[J]. 光学精密工程, 2009, 17(5):943-950.
ZHANG J L, WANG K R, YU CH X, *et al.*. Application of fiber loop mirror to demodulation system of fiber grating sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5):943-950. (in Chinese)
- [3] 蒋奇,隋青美,马宾. 单模光纤耦合传感器的设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11):2657-2664.
JIANG Q, SUI Q M, MA B. Design of single mode optic coupling sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11):2657-2664. (in Chinese)
- [4] WEI Y, SUN B. Wavelength spacing tunable dual-wavelength single-longitudinal-mode fiber ring laser based on fiber Bragg gratings [J]. *Laser Physics*, 2009, 19(6):1252-1256.
- [5] DOMINIQUE B. Optical fiber amplification technology [J]. *Annals of Telecommunications*, 2003, 58(11):1603-1639.
- [6] ZHAO L M, TANG D Y, CHENG T H, *et al.*. Passing harmonic mode locking of soliton bunches in a fiber ring laser [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2008, 40(13):1053-1064.
- [7] FENG D. *Metal Physics* [M]. Beijing: Sciences Press, 1999. (in Chinese)
- [8] LAWN B R, WILSHAW T R. *Fracture of Brittle Solids* [M]. London: Cambridge University Press, 1974.
- [9] CHENG S Q. *Fracture Mechanics* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1984. (in Chinese)
- [10] GELL M, SMITH E. The propagation of cracks through grain boundaries in polycrystalline 3% silicon-iron [J]. *Acta Met.*, 1967, (13):253.

作者简介:



李殿军(1957—),男,吉林长春人,研究员,主要从事光学技术、光学工程及其应用的研究。



孟范江(1957—),男,黑龙江牡丹江人,副研究员,主要从事光学技术、光学工程及应用的研究。



李世明(1964—),男,黑龙江牡丹江人,副研究员,主要从事精密机械结构和设计的研究。

● 下期预告

硅微谐振式加速度计的实现及性能测试

石 然, 袁安萍, 苏 岩

(南京理工大学 MEMS 惯性技术研究中心, 江苏 南京 210094)

为了提高硅微谐振式加速度计的性能,从一种基于 DDSOG(Deep Dry Silicon on Glass)工艺的硅微谐振式加速度计样机入手,阐述了加速度计的结构、加工方法和接口电路。谐振式加速度计结构包括了敏感质量块、谐振器和微杠杆三部分,采用差动结构来减小共模误差的影响。接口电路中采用了自动增益控制电路来稳定谐振器的振幅,成功实现了谐振器的闭环自激振荡和频率检测。分析了谐振式加速度计频率输出与加速度输入的关系。实验中发现,DDSOG 工艺中采用的玻璃材料和硅材料温度系数不同,影响了加速度计的温度特性。实验结果表明,硅微谐振式加速度计样机可以达到如下性能:量程 $\pm 50 g$, 标度因数 143 Hz/g , 零偏稳定性 1.2 mg , 零偏重复性 0.88 mg , 阈值 $170 \mu\text{g}$ 。