

文章编号: 0253-2239(2010)12-3425-05

高精度光纤变维器的制作及测试研究

梁静秋

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要 为解决光谱分析及超光谱成像、医学和军事侦察等系统应用中有序密排光纤变维器(OFDTE)存在的定位精度低的问题,利用单晶硅材料的晶格特点和微机电系统(MEMS)的精确定位技术,提出了制作高精度光纤变维器的光纤平面排布方法。分析了系统误差,研究了光纤排列、固化、研磨抛光及封装工艺,制作了2000根光纤的 1×2 光纤变维器。测量结果为线列端长度累计误差为 $0.5 \mu\text{m}$;局部高度误差小于 $0.15 \mu\text{m}$;器件端面表面粗糙度均方根值小于 0.9 nm ;在2000周期范围内,光纤阵列端面纵向位置误差最大值为 190.5 nm ;表面未镀膜的光纤变维器的透射率为 51.46% 。经过随机振动后,器件的断丝率增加 0.1% 。通过 $-40 \text{ }^\circ\text{C} \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度循环实验,器件结构及性能未发生变化。

关键词 光纤光学;光纤变维器;平面排纤工艺;结构误差;透射率;随机振动

中图分类号 V19; P111 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103012.3425

Fabricating and Testing of High-Accuracy Optical-Fiber Dimension Transform Element

Liang Jingqiu

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract In order to improve the accuracy of the optical-fiber dimension transform element (OFDTE) which is used in spatial exploration, imaging system, iatrology and military reconnaissance, the plane arranging method of fiber array based on silicon V-grooves is established. Firstly, the system error of the OFDTE is analyzed. Then, experiments are performed on arranging fibers, solidifying glue, polishing end surface and packaging device. Finally, a 1×2 OFDTE containing 2000 optical fibers is fabricated. The measurement results indicate that the maximum error accumulated in 2000 periods of the silicon V-grooves is $0.5 \mu\text{m}$, and the error of the height in Si-V grooves is less than $0.15 \mu\text{m}$. The value of root mean square of roughness of the end face is less than 0.9 nm . Furthermore, the position error of the end surface in 2000 periods is 190.5 nm . The transmittance of the OFDTE without optical film is 51.46% at the wavelength of 632.8 nm . After random vibration experiment, the ratio of the broken fiber increases by 0.1% . The characteristics of device keep stable when environmental temperature is changed within $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ to $40 \text{ }^\circ\text{C}$.

Key words fiber optics; optical-fiber dimension transform element; plane arranging method of fiber array; structure error; trasmittance; random vibration

1 引 言

光纤图像传输及转换器件具有柔软、重量轻、使用自由度大和易实现复杂空间结构的图像传递等特点,近几年越来越多地被研究和应用于光学成像及探测等系统中^[1~5]。其中光纤变维器(OFDTE)作

为一种重要的的光学器件,在光谱成像以及光谱分析仪器中得到了越来越多的应用。日本国立天文台采用光纤变维器来转换光束形状和聚焦比率,从而将望远镜在焦平面所成的像传输到光谱仪的入射狭缝,提高了光谱仪的分辨率和信息处理能力^[3]。英

收稿日期: 2010-06-08; 收到修改稿日期: 2010-08-02

基金项目: 国家自然科学基金(60977062, 61027010)和国家 863 计划(2009AA04Z315)资助课题。

作者简介: 梁静秋(1962—),女,博士,研究员,博士生导师,主要从事微光机电系统及微结构光学等方面的研究。

E-mail: liangjq@ciomp.ac.cn(中国光学学会会员号:1309126)

国科学家在光谱仪中引入光纤变维器,研制出了能成高空间分辨率全色像的超光谱成像仪^[4]。此外,光纤变维器还可以作为一种新型的拼接器件来解决传统的机械拼接方法和光学棱镜拼接方法中配准精度和定位精度要求高、难于获得超长线阵探测器的问题^[6],因而有望成为简化星载望远镜结构的一个重要部件。我国在光谱分析和成像系统方面做了大量的研究工作^[7~10],而高精度光纤变维器的研制将有助于促进这些研究的进一步开展。

光纤变维器传统的制备方法是采用鼓轮卷绕法,将光纤进行紧密排列来制作的。这种方法工艺成熟,是当前使用较普遍的方法。在这种制作方法中,光纤的定位精度是通过光纤直径的精度来决定的,而光纤直径的不均匀性直接影响变维器的性能参数。为此,本文提出基于 Si-V 型槽的平面排列光纤的方法,研制出一种具有较高结构精度的长线列光纤变维器。

2 光纤变维器的结构设计

图 1 为光纤变维器的结构示意图,它的一端的端面如图 1(a)所示,是由 N 根光纤紧密地排成一排;另一端为有序排列的 m 排光纤组成的矩形或正方形面阵,每排含 N/m 根光纤,如图 1(b)(以 $m=3$ 为例)。也可以是由多个线阵有序排列叠成如图 1(c)所示的结构,它的输入端为紧密排列的 N 根光纤线列,输出端为 m 排光纤,每排含 N/m 根光纤。

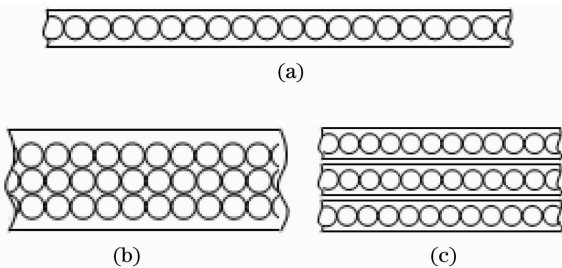


图 1 光纤变维器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of OFDTE

单晶硅是一种在微纳器件中应用十分广泛的材料^[11,12],本文利用光刻以及单晶硅的各向异性腐蚀技术制作高精度的光纤定位槽,然后利用平面引导法将光纤在 Si-V 型槽内相关排列,实现光纤阵列的精确定位。图 2 为各向异性腐蚀基本原理,图 3 为光纤与硅 V 型槽的定位关系。这种结构及制作方法避免了由于光纤直径不均匀而产生的累积误差,如图 4 所示。

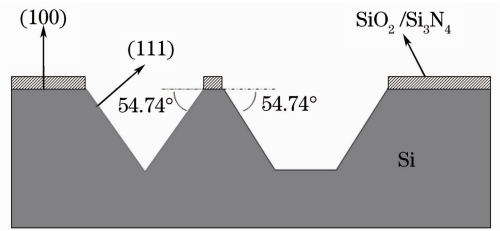


图 2 (100)硅的各向异性腐蚀示意图

Fig. 2 Schematic diagram of anisotropic etching in (100) silicon wafer

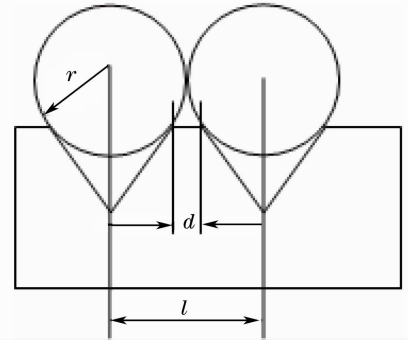


图 3 光纤阵列与 V 型槽之间的位置关系

Fig. 3 Schematic diagram of fiber array in V-grooves

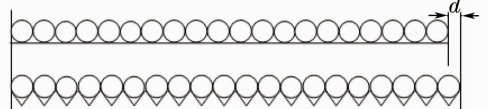


图 4 紧密排列与 V 型槽定位方式的对比

Fig. 4 Comparison between tight array and the V-groove array pattern

3 光纤变维器的制作

有序密排光纤变维器的主要制作步骤如下:

1) 制备 Si-V 型槽阵列。以 (100) 单晶硅片作基底,用 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 作为腐蚀窗口的掩蔽层,用 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 的 30% KOH 腐蚀液各向异性腐蚀得到以 (111) 面为侧壁的 V 型槽。

2) 光纤定位。可采用如图 5 所示的 Si-fiber-Si 或 Si-fiber-glass 两种压片方案。在洁净室内把清洁处理后的光纤以平面排纤方式平行放入 Si-V 型槽中,通过平面引导工艺,使 A 端和 B 端的光纤一一对应。注入环氧树脂粘接剂,用压片压紧并热固化。

3) 研磨抛光和器件封装。采用机械抛光方法,除去光纤表面的损伤和形变,使端面平整,表面粗糙度达到纳米量级。然后,采用硬质封装或软质封装方式对器件进行封装。图 6 为光纤变维器 A 端端面的局部照片。其中每根光纤由纤芯和包层两部分

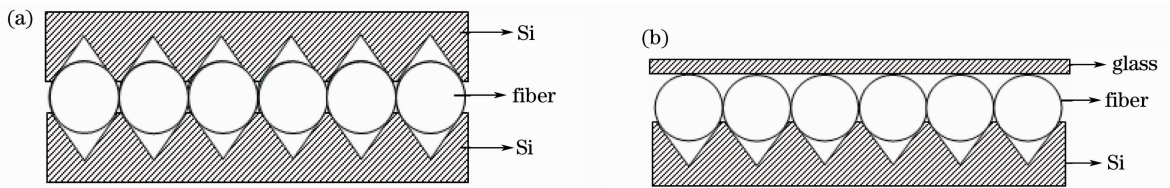


图 5 两种封装结构的示意图。(a) Si-fiber-Si 封装, (b) glass-fiber-Si 封装

Fig. 5 Schematic diagram of two packaging. (a) Si-fiber-Si packaging, (b) glass-fiber-Si packaging

组成,纤芯的标准直径为 $24\ \mu\text{m}$,包层厚度为 $1\ \mu\text{m}$,光纤数量 N 为 2000 根。图 7 为 A 端端面的通光状态。



图 6 光纤变维器 A 端的局部端面照片

Fig. 6 Photo of OFDTE's end face

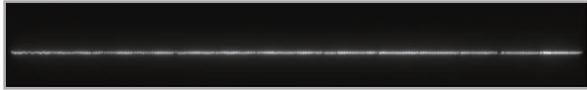


图 7 光纤变维器 A 端的通光状态

Fig. 7 Photo of OFDTE which is illuminated by a monochromatic light source

4 器件测试

4.1 结构测试

1) 串长误差测试:用双频激光干涉测长仪对 V 型槽进行测量,得到 2000 周期最大串长误差为 $0.5\ \mu\text{m}$,在器件允许的误差范围之内。

2) 高度误差测试:V 型槽侧壁与上表面呈 54.74° 角,这是由硅单晶的晶格结构决定的,V 型槽的宽度可作为衡量 V 型槽结构精度的代表性参数^[13]。用扫描电子显微镜(SEM)测得最大槽宽误差为 $0.2\ \mu\text{m}$,从而引起的高度误差小于 $0.15\ \mu\text{m}$ 。图 8 为 V 型槽阵列的 SEM 照片。

3) 表面粗糙度测试。采用 Di3100s 型原子力显微镜对光纤变维器端面的表面粗糙度进行了测试,测试结果为,光纤端面表面粗糙度均方根值最大值为 $0.866\ \text{nm}$ 。

4) 端面面型测试:端面面型决定着光纤端面纵向位置误差。如果面型精度过低,就会在成像系统中引入像差,从而影响成像质量。抽取 3 个光纤线列样品,利用 1000 GPI^{XP}HR 型 Zygo 数字干涉仪(美国 Zygo 公司)对 2000 根线列光纤端面进行检测,图 9 为测量数据,得到光纤阵列端面纵向位置误差

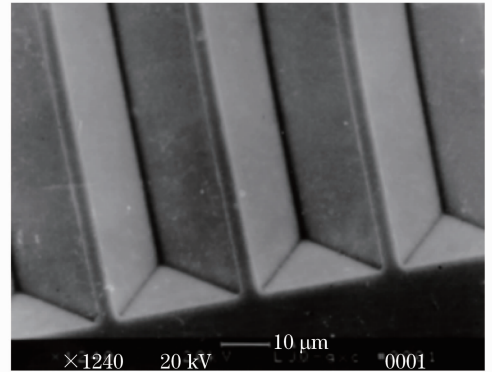


图 8 V 型槽阵列的 SEM 照片

Fig. 8 SEM photo of V-groove array

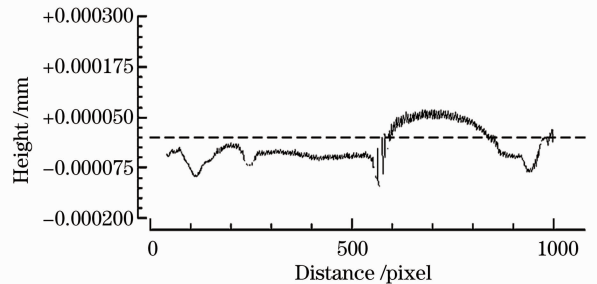


图 9 端面面型测试结果

Fig. 9 Test result of the end face pattern

最大值为 $190.5\ \text{nm}$ 。

4.2 透射率测试

光纤变维器的透射率采用如图 10 所示装置检测。光源选用波长为 $632.8\ \text{nm}$,功率为 $50\ \text{mW}$ 的 He-Ne 激光器。在光路中放置激光扩束器以避免光在传输过程中由于功率密度过高而产生的非线性散射损耗。狭缝的宽度为 $26\ \mu\text{m}$ 。

测试时,先探测未放置光纤变维器的光强,由硅光电探测器转换为电信号,以电压值 V_{in} 表示出来[图 10(a)]。然后,将光纤变维器的 A 端紧接在狭缝后,B 端连接光电探测器,转换后的电压值用 V_{out} 表示[图 10(b)]。由此得到光纤变维器的透射率为 $V_{\text{in}}/V_{\text{out}} = 51.46\%$,与理论值 54.56% 比较接近。

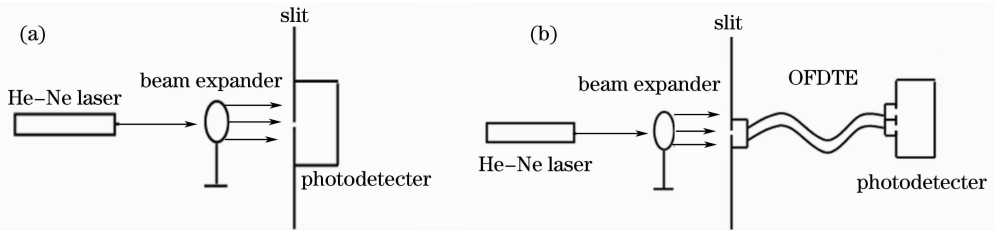


图 10 光纤变维器的透射率测试装置。(a)未放置 OFDTE,(b)放置 OFDTE

Fig. 10 Test device of transmittance of OFDTE's. (a) without OFDTE, (b) with OFDTE

4.3 振动测试

以功率谱密度(PSD),单位为 g^2/Hz ,描述随机信号 $X(t)$ 在频域的统计特性,用均方根加速度 g_{rms} 表示随机振动的量级, g_{rms} 的值由功率谱密度(PSD)对频率积分后开方得到。随机振动实验条件如表 1 所示。

表 1 随机振动实验条件

Table 1 Conditions of random vibration

Frequency spectra /Hz	PSD1	PSD2
10-250	6 dB/oct	6 dB/oct
250-600	0.0096 g^2/Hz	0.084 g^2/Hz
600-2000	-9 dB/oct	-15 dB/oct

测试表明,在 PSD1 的条件下,均方根加速度 $g_{\text{rms}1}=2.6 g$,振动前后的断丝率增加 0;在 PSD2 条件下,均方根加速度 $g_{\text{rms}2}=6.99 g$,振动前后的断丝率增加 0.1%。

4.4 温度循环测试

为了分析器件的抗温度变化特性,做了两组典型的温度实验。第一组实验的温度范围为 $-40\text{ }^\circ\text{C}\sim 40\text{ }^\circ\text{C}$,温度循环周期为 2 h,实验时间为 48 h。通过显微镜观察表明,实验前后端面没有发现变化。第二组实验温度范围为 $0\text{ }^\circ\text{C}\sim 320\text{ }^\circ\text{C}$,循环周期为 2 h,48 h 后,通过高倍显微镜观察,发现在光纤顶部的粘接剂出现了断裂现象。用有限元分析软件建立了器件的模型,依次输入各种材料的力学参数,对整个热学系统进行了瞬态分析。结果发现,随着温度的增加,断裂点处产生的应力也相应增加,并且在温度达到 $320\text{ }^\circ\text{C}$ 时,应力增加到 124 Pa。接近所采用的环氧树脂胶所能承受的压缩/拉伸强度。因此,应适当选择粘接剂,使之压缩/拉伸强度满足器件工作温度要求。

5 结果讨论

基于 Si-V 型槽的平面排列光纤方法制作的长射线列光纤变维器的结构误差主要包括光纤直径误差、V 型槽的制作误差和光纤阵列端面纵向误差等。

V 型槽制作误差与单晶硅片的面型精度误差、光刻版的制作误差、光刻及掩蔽层腐蚀的误差、硅片各向异性腐蚀 V 型槽的工艺误差等有关。由于单晶硅片的加工精度较高、光刻腐蚀的工艺较成熟,实验中 V 形槽的制作误差远小于由光纤均匀性引起的器件结构误差。

光纤直径尺寸误差是引起器件高度误差的主要原因之一。对于直径为 D 的光纤,光纤直径为 $D\pm 1\text{ }\mu\text{m}$ 时,引起的光纤中心轴高度误差为 $\pm 0.88\text{ }\mu\text{m}$,引起器件高度误差 $\pm 1.75\text{ }\mu\text{m}$ 。

粘接剂的性能直接关系到器件的可靠性及寿命。由于器件的核心部分的光纤阵列是由多组分光纤材料、硅片和粘接剂等多种材料组成,其热膨胀系数、热导率和泊松比等参数不同,因此当整个器件处于温度变化的环境当中时,不同材料之间或同种材料内部都会产生应力。当这种应力积累到一定程度,就会导致裂纹的出现,从而降低器件的可靠性,影响器件的寿命。

为了加强器件的可靠性,粘接剂应满足以下几个方面:粘接性好;粘度低、流动性好、渗透性强;固化后有一定的韧性,便于后续切形工艺的完成;硬度高、强度高,能研磨抛光;长期稳定性好,耐老化;固化温度适中。

6 结 论

提出了基于 Si-V 型槽的平面排纤方法,通过制备 Si-V 型槽阵列、光纤定位、研磨抛光及封装等工艺研制出一种长射线列光纤变维器,并进行了结构测试、透射率测试及振动测试。实验结果表明,所制备的 Si-V 型槽 2000 周期长度累计误差为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$; Si-V 型槽局部高度误差小于 $0.15\text{ }\mu\text{m}$;制成后的器件端面粗糙度均方根值小于 0.9 nm ;在 2000 周期范围内,光纤阵列端面纵向位置误差最大值为 190.5 nm ;用波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光做光源,测得表面未镀膜的光纤变维器的透射率为 51.46%;经过均方根加速度为 $2.6 g$ 和 $6.99 g$ 的

随机振动后,器件的断丝率分别增加 0 和 0.1%,基本满足抗振性要求。温度循环实验表明,所使用的粘接剂在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的工作环境下具有较高的可靠性。实验温度范围为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 320\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,在光纤顶部的粘接剂发生了断裂现象。因此,在制作中,应适当选择粘接剂,使之压缩/拉伸强度满足器件的特定工作温度要求。

致谢 感谢长春光学精密机械与物理研究所向阳、卢振武、梁中翥、裴舒老师及侯凤杰、郭鹏同学等在器件制作和测试中的帮助。

参 考 文 献

- 1 JaeHo Han, Junghoon Lee, Jin U. Kang. Pixelation effect removal from fiber bundle probe based optical coherence tomography imaging [J]. *Opt. Express*, 2010, **18** (7): 7427~7439
- 2 Yang Shengjie, Fang Zhiliang, Zhou Juwei *et al.*. Full field Fourier transform spectrometer without scanning elements[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(11): 1282~1286
杨胜杰, 方志良, 周巨伟等. 全视场非扫描超光谱成像系统研究[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(11): 1282~1286
- 3 Masanori Iye, Noboru Ebizuka, Hidekami Takami. Fiber pupil slicer-A versatile light feed for spectrographs [C]. *SPIE*, 1998, **3355**: 417~423
- 4 David William, Fletcher-Holmes, Andrew Robert Harvey. A snapshot foveal hyper-spectral imager [J]. *SPIE*, 2002, **4816**: 407~414
- 5 Hao Shenglin, Alex Versteegh. VisIRIS-A Visible/IR imaging spectropolarimeter based on a birefringent fiber-optic image slicer [C]. *SPIE*, 2006, **6269**: 62690k-1
- 6 Zheng Yuquan. A device for connecting long-linear-detector based on dimension transformer of optic-fiber [P]. China; 200510016818.3, 2005.11.9
- 7 Feng Xiaoyong, Zhu Ming, Xiang Zhiqiang. Method of television real-time detection on dark and small stars targets in the daytime [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1009~1014
冯小勇, 朱明, 向治强. 白天暗小恒星目标电视实时探测[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1009~1014
- 8 Liang Shuang, An Zhiyong, Feng Yutao *et al.*. Scenery radiation acquisition features of short-wave infrared imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1304~1307
梁爽, 安志勇, 冯玉涛等. 短波红外成像光谱仪的景物辐射采集特性[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1304~1307
- 9 Kong Yanmei, Liang Jingqiu, Wang Bo *et al.*. The investigation and simulation of a novel spatially modulated micro-Fourier transform spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, **29**(4): 1142~1146
孔延梅, 梁静秋, 王波等. 新型空间调制微型傅里叶变换光谱仪的设计与仿真[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, **29**(4): 1142~1146
- 10 Yu Benguo, Wang Jianzhong. Research on spectrum detection with non-scanning spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2001~2005
余本国, 王建中. 基于非扫描式干涉仪的光谱探测研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2001~2005
- 11 Yu Huaiyong, Zhang Chunxi, Feng Lishuang *et al.*. Analysis of rayleigh backscattering noise in micro-optical resonance gyroscope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 799~804
于怀勇, 张春熹, 冯丽爽等. 硅基微光学谐振式陀螺瑞利背向散射噪声分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 799~804
- 12 Qian Kun, Li Fangqiang, Cheng Meiyong *et al.*. MEMS infrared emitter based on SOI wafer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1455~1458
钱昆, 李方强, 程美英等. 基于绝缘体上硅晶片的微机电系统红外光源[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1455~1458
- 13 Liang Jingqiu, Hou Fengjie. One-dimension optical fiber array with silicon V-grooves[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(1): 90~94
梁静秋, 侯凤杰. 采用硅 V 型槽的一维光纤阵列的研制[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(1): 90~94