

文章编号 1004-924X(2007)01-0089-06

# 采用硅 V 型槽的一维光纤阵列的研制

梁静秋<sup>1</sup>, 侯凤杰<sup>1,2</sup>

(1. 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, 130031; 2. 中国科学院 研究生院 北京 100039)

**摘要:** 阐述了一维光纤阵列的研制方法, 分析了 V 型槽法中硅 V 型槽腐蚀机理, 计算了 V 型槽的开口及间距与光纤半径及纤芯截面圆心距的关系, 给出了最小槽深与光纤半径及 V 型槽开口的关系式。用各向异性腐蚀技术制作了硅 V 型槽, 比较了紫外及红外粘接剂的性能, 进行了光纤的排列、粘接及抛光, 制作出一维光纤阵列。用原子力显微镜测量光纤阵列表面粗糙度为纳米量级, 用 ZYGO 数字干涉仪检测光纤的端头位置误差为 3~5  $\mu\text{m}$ 。该项工作为二维光纤阵列的高精度制备奠定了基础。

**关键词:** 光纤阵列; 硅 V 型槽; 各向异性腐蚀; 端面检测

**中图分类号:** TN253 **文献标识码:** A

## One-dimension optical fiber array with silicon V-grooves

LIANG Jing-qiu<sup>1</sup>, HOU Feng-jie<sup>1,2</sup>

- (1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031, China;*  
2. *Graduate School of the Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** one-dimension optical fiber array has been extensively applied in optical communication, optical imaging and detection systems recently. The manufacturing method of one-dimension optical fiber array and the principle of etching Si-V-grooves are introduced. The size of Si-V-grooves and the space between them are calculated according to the radius of the fiber, and a formula on the minimum depth of the Si-V-grooves is given, which related with the fiber radius and the opening space of the grooves. As a typical example, the silicon V-groove array is micromachined with anisotropic etching process, then the fibers are arranged and adhered in corresponding to the Si-V-grooves. The roughness of polished fiber surface measured with atomic force microscope (AFM) is in nanometer magnitude, and the position error is 3~5 micron, which shows these works will lay the foundation for further study on two-dimension fiber array.

**Key words:** optical fiber array; silicon V-groove; anisotropic etching; measurements of the fiber surface

收稿日期: 2006-05-11; 修订日期: 2006-09-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助(No. 60578036); 中科院“优秀博士学位论文、院长奖获得者科研启动专项资金”资助; 应用光学国家重点实验室开放基金资助

## 1 引言

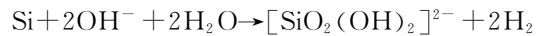
近年来,一维光纤阵列作为一种重要的光学器件得到了广泛重视。例如,在光通信领域,由于光器件中光纤与芯片耦合的对准精度要求十分严格,因此大量采用光纤阵列 FA(Fiber Array)实现光学元件的精确连接。一维光纤阵列也应用在光纤传像器件中,与传统的光学成像系统相比,光纤传像器件具有柔性传像、使用空间自由度大、易实现细长结构、重量轻等特点,广泛应用在医学、工业、科研、军事等众多领域<sup>[1,2]</sup>。此外,在太阳系外的行星的探测中,Jian Ge, Dan McDavitt 等将一维光纤阵列运用到陆地行星探测器中,以实现有效消除残余恒星泄散射的影响<sup>[3]</sup>。因此,对用于各个领域不同结构要求的一维光纤阵列的制作方法和可靠性进行研究具有重要意义。

目前国内外研制一维光纤阵列的方法主要有钻孔法、光通道密排法和 V 型槽法等<sup>[4]</sup>。钻孔法是在一定厚度的基片上制作定位孔阵列,将光纤插入后注胶固化、研磨。光纤间距可由需要确定,位移误差较小,但不适于密排光纤阵列,且角偏差较大。光通道密排法是在平面度很高的槽内,将光纤紧密排放并固定。该方法可扩展性好,但不能任意调整光纤通道间距,只适合于制作密排列光纤阵列,并且累积误差较大。V 型槽法是在高平面度的基片上刻 V 型槽,将光纤排列并固定在 V 型槽内。如果采用单晶硅作基底,所制作的 V 型槽具有结构精确,一致性好等优点,对于分离型及密排列的光纤阵列均适用。

在实际应用中,FA 的特性对于光学器件的可靠性起十分重要的作用。FA 的结构参数主要包括光纤位移误差、角偏差,光纤阵列端面粗糙度及纵向位置误差等。光学参数主要有插损和回损等。为了研究出能够适用于各个领域、多种光纤类型、不同线列长度、分离型或密排列的一维光纤阵列的制作及提高可靠性的方法,本文以单模光纤阵列为例,阐述了一维光纤阵列的研制方法和其中的 V 型槽法的硅 V 型槽腐蚀机理,给出 V 型槽的尺寸设计及最小槽深公式。用各向异性腐蚀技术制作了硅 V 型槽,将光纤在 V 型槽中排列、粘接,制作出一维光纤阵列并对结构参数进行了测试,对影响 FA 可靠性的因素进行了分析。

## 2 一维光纤阵列的设计

采用 V 型槽法制备一维光纤阵列。用(100)单晶硅片作基底,用各向异性湿法腐蚀技术制作 V 型槽。在单晶硅的各向异性腐蚀中,(111)晶面的腐蚀速度最慢,因此,暴露出来的槽侧面为(111)面。在(100)面上沿(110)晶向光刻线条,腐蚀出的结构即为 V 型槽,槽侧面(111)面与基片上表面(100)面的夹角为 $54.74^\circ$ 。KOH、NaOH、CeOH 等碱性金属的氢氧化物均可作为硅的各向异性腐蚀剂。基本反应为:



在各向异性腐蚀过程中,沟槽的形状首先呈现以(111)为侧面,(100)为底的梯型槽。如图 1 中 B 槽的形状,随着深度继续增加,(100)底面不断收缩。当腐蚀到适当深度时,底面收缩成一条直线,形成 V 型槽结构,如图 1 中 A 槽。槽的形状由槽深和开口尺寸决定。同时,掩蔽膜的选取和侧向钻蚀的补偿对于实现 V 型槽设计精度十分重要。

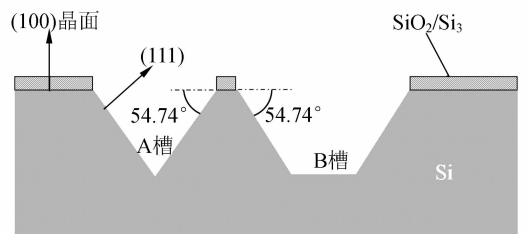


图 1 (100)硅的各向异性腐蚀示意图

Fig. 1 Schematic diagram of anisotropic etching in (100) silicon wafer

采用 V 型槽固定光纤时,光纤截面必须同时有两点与槽的侧壁接触,以保证光纤径向位置的唯一性。图 2 为光纤与 V 型槽之间位置关系的示意图,光纤半径为  $r$ ,相邻 V 型槽间距为  $d$ ,相邻光纤中心距为  $l$ 。为了设计硅 V 型槽的光刻版,针对光纤截面圆心在硅片表面上、上方和下方三种情况,计算了在给定  $l$  及  $r$  的前提下 V 型槽的开口宽度及相邻 V 型槽的间距。图 3 给出了 V 型槽开口宽度  $EF$ (或  $E'F'$ ,  $E''F''$ )、深度  $CB$ (或  $C'B$ ,  $C''B$ )与光纤半径  $r$  及光纤截面圆心距硅片表面的垂直距离  $OC$ (或  $OC'$ ,  $OC''$ )的关系,图 3 中  $OA$  即为  $r$ 。

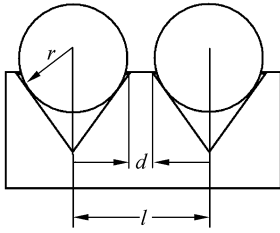
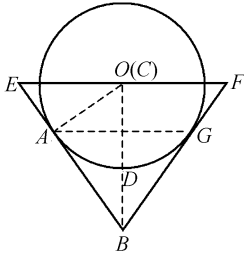


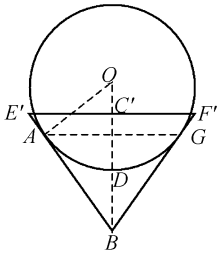
图 2 光纤与 V 型槽之间的位置关系

Fig. 2 Schematic diagram of fiber array in V-grooves



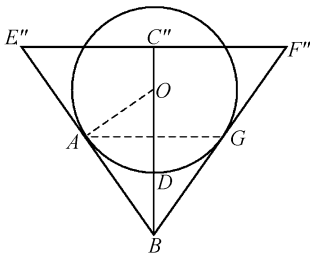
(a) 光纤截面圆心在硅片表面

(a) Center of the optic fiber on the surface of a Si-slice



(b) 光纤截面圆心在硅片表面下方

(b) Center of the optic fiber below the surface of a Si-slice



(c) 光纤截面圆心在硅片表面上方

(c) Center of the optic fiber upon the surface of a Si-slice

图 3 V 型槽结构尺寸与光纤位置的关系

Fig. 3 Relationship of the V-groove opening with fiber location

对于图 3(a), 光纤芯圆心  $O$  在  $EF$  连线上, 即在高度上与单晶硅片上表面重合, 由几何学可得:

$$d = l - 2.4506r, \quad (1)$$

对于图 3(b), 光纤芯圆心  $O$  在  $EF$  连线上, 设  $OC' = h_1$ , 有:

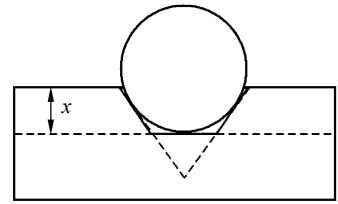
$$d' = l - 2.4506r + 1.4161h_1, \quad (2)$$

对于图 3(c), 光纤芯圆心  $O$  在  $EF$  连线下方, 设  $C''O = h_2$ , 有:

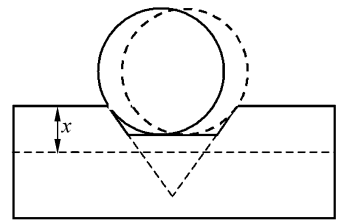
$$d'' = l - 2.4506r - 1.4161h_2, \quad (3)$$

在 V 型槽的实际制作中, 在确定光纤半径和 V 型槽的开口宽度后, 存在一个槽深的最小值  $x$ , 当槽深大于或等于  $x$  时, 光纤位置可以被唯一确定, 如图 4(a); 反之, 如果槽深小于  $x$ , 则光纤可在槽中移动如图 4(b)。计算表明, 在图 3 的三种位置关系下, 均可使用公式(4)求出最小深度  $x$ :

$$x = 0.7062(l - d) - 0.7305r, \quad (4)$$



(a)



(b)

图 4 V 型槽深度与光纤在槽中的位置关系

Fig. 4 Relationship of the V-groove depth with fiber position

### 3 实验

#### 3.1 制作硅 V 型槽

如图 5 所示的流程制作硅 V 型槽, 其具体步骤为: (a) 选用研磨、抛光后的且平行度和平面度良好的(100)硅片进行清洁处理; (b) 氧化或氮化生长适当厚度的二氧化硅和氮化硅, 作为硅腐蚀

的掩模;(c)涂覆厚度约  $1\ \mu\text{m}$  的光刻胶,煎烘;(d)在紫外曝光机上将光刻版的线条方向与硅片的参考边调至平行,曝光、显影形成光刻胶图形;(e)以光刻胶为掩模,采用反应离子刻蚀去除腐蚀窗口的二氧化硅和氮化硅薄膜。在这一步骤中,需要严格控制刻蚀条件,避免侧向钻蚀;(f)去除光刻胶;(g)在二氧化硅和氮化硅薄掩模下,用 70% 的 KOH 腐蚀液在  $70\ ^\circ\text{C}$  条件下腐蚀硅 V 型槽;(h)最后,去除二氧化硅和氮化硅薄膜,完成 V 型光纤槽阵列的制作。图 6 给出了所制作的硅 V 型槽的 SEM 照片。

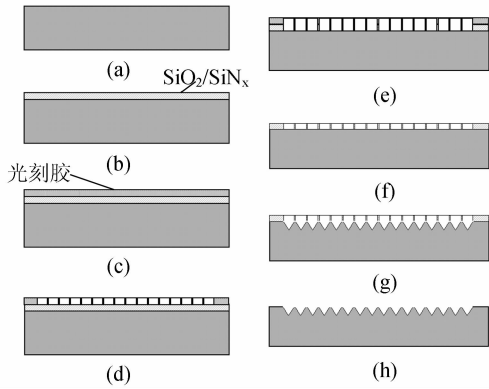


图 5 光纤槽阵列制作工艺

Fig. 5 Micromachining of V-groove array

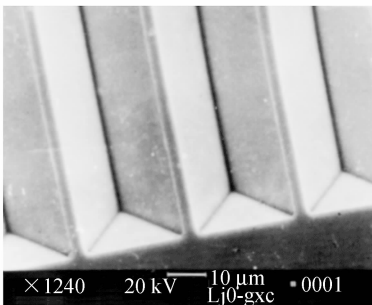


图 6 硅 V 型槽的 SEM 照片

Fig. 6 SEM of V-grooves etched on a silicon wafer

### 3.2 光纤与 V 型槽的排列与粘接

在万级洁净环境下进行光纤排列。将光纤依次平行放置于 V 型槽内,用固化胶进行粘接。选用紫外固化胶和红外环氧胶两种粘结剂进行粘接,摸索了粘结剂种类、浓度、固化条件与粘附性、硬度的关系。紫外固化胶凝固很迅速,不会产生红外环氧胶固化时间较长,固化中易流动等问题。但是这种胶的粘合强度稍低于红外环氧胶,在一定程度上会降低光纤阵列的可靠性。此外,紫外

固化胶需要一种紫外透明的衬底或上盖,不适合 Si-光纤-Si 结构光纤阵列的封装。Norland 紫外固化胶和 353ND 红外粘接剂具有良好的粘接附、韧性及强度,可以用作高精度一维光纤阵列的光纤固定。

采用了两种光纤阵列抛光方法,一种是将光纤单根抛光后顺序排列,调整位置,粘接固化。这种方法的优点是在光纤位置调整过程中易于观测,但光纤端面的纵向位置精度不易保证;另一种方法是将光纤固定后将光纤阵列整体进行研磨,可以保证光纤端面的纵向位置精度,但光纤表面粗糙度的高精度指标的实现有一定难度,而且不利于在排列工艺中进行观测。图 7 为采用第二种方法抛光后的一维单模光纤阵列的光学显微镜照片,光纤直径为  $125\ \mu\text{m}$ 。图 8 为光纤阵列端面局部放大的 SEM 照片,V 型槽周期为  $130\ \mu\text{m}$ 。根据公式(4)的计算得出,最小深度  $x$  为  $44.7\ \mu\text{m}$ ,实际制作的 V 型槽深度为  $46\ \mu\text{m}$ 。

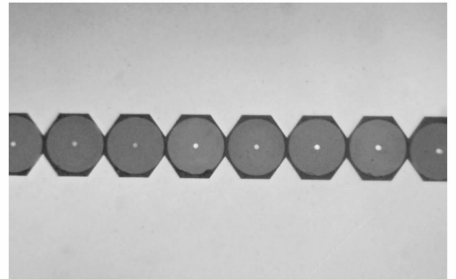


图 7 一维光纤阵列的端面照片

Fig. 7 Front view of polished surface of one-dimensional fiber array

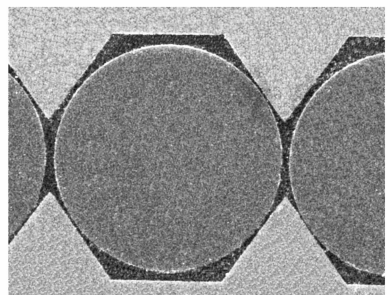


图 8 局部放大的端面 SEM 照片

Fig. 8 SEM of the surface in Fig. 7

## 4 测 试

采用了计算机辅助 CCD 成像测量系统。

CCD 相机拍摄到传像束所输出的图像,并显示在监测器的显示屏上,从而测量出 V 型槽阵列及光纤阵列的位置精度,如图 9 所示。测得纤芯高度位置误差小于  $2 \mu\text{m}$ ,相邻光纤间距误差小于  $1 \mu\text{m}$ 。用原子力显微镜测量光纤阵列表面粗糙度小于  $3 \text{ nm}$ ,用 ZYGO 数字干涉仪检测光纤的端面纵向位置误差小于  $1 \mu\text{m}$ 。影响光纤阵列位置精度的因素主要有硅凹槽的精度,光纤的尺寸精度及粘接剂厚度及均匀性等。由于单晶硅 V 型槽制作技术的精度在亚微米量级,因此,位置误差主要由后几种因素决定。此外,工艺环境对精度的影响亦不容忽视,如图 10 所示,槽中的杂质会引起光纤高度和间距误差。

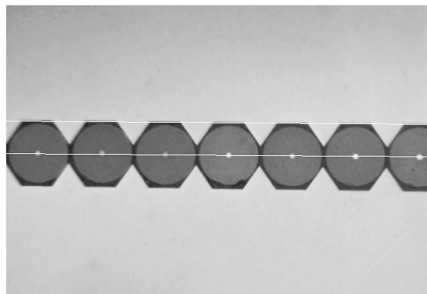


图 9 光纤阵列高度误差测量

Fig. 9 Measuring error of 2-D optical fiber bundle arrays

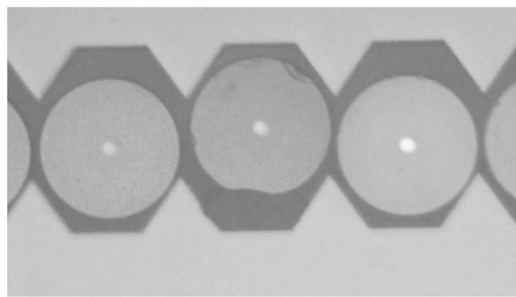


图 10 槽内杂质引起光纤位置误差

Fig. 10 Position error resulting from impurity in grooves

相比具有更高的精度。根据硅单晶的结构特点,采用各向异性腐蚀技术,用 KOH 腐蚀液在(100)硅片上进行各向异性湿法腐蚀制作了硅 V 型槽阵列。给出了 V 型槽开口及最小腐蚀深度计算公式。在光纤阵列的粘接工艺中,比较了紫外及红外粘接剂的性能,Norland 紫外固化胶和 353ND 红外粘接剂具有良好的粘附、韧性及强度,可以用作高精度一维光纤阵列的光纤固定粘接剂。采用光纤排列后抛光的方法,制做出一维单模光纤阵列。测试结果为纤芯高度位置误差小于  $2 \mu\text{m}$ ,相邻光纤间距误差小于  $1 \mu\text{m}$ 。光纤阵列表面粗糙度小于  $3 \text{ nm}$ ,光纤的端面纵向位置误差小于  $1 \mu\text{m}$ 。位置误差主要由光纤的尺寸精度、粘接剂厚度及均匀性等因素决定。此外,工艺环境对精度的影响也很重要。

## 5 结 论

硅 V 型槽法制作一维光纤阵列与其他方法

## 参考文献:

- [1] 迟泽英,陈文建,李武森,等. 无源光纤传像技术军事应用研究[C]. 全国第十二次光纤通信暨第十三届集成光学学术会议,2005,854-859.  
CHI Z Y, CHEN W J, LI W S, *et al.*. Research of optical fiber imaging technology in military[C]. OFCIO, SiHui, 2005, 854-859. (in Chinese)
- [2] 王慧,向阳,禹秉熙. 线列光纤传像束的调制传递函数评价方法及检测[J]. 光学精密工程,2005,13(2):185-190.  
WANG H, XIANG Y, YU B X. Comprehensive estimating and measuring method of line-array fiber-optic image

bundles based on the modulation transfer function[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(2):185-190. (in Chinese)

- [3] JIAN G, MCDAVITT D, MILLER S. Development of an extremely coherent single mode fiber bundle array for high contrast imaging of extrasolar planets with visible Terrestrial Planet Finder[J]. *SPIE*, 2004, 5491: 628-635.
- [4] 袁菁, 罗风光, 曹明翠. 一种新型的 I/O 光纤阵列接口制作方法[J]. *光通信技术*, 2004, (10): 53-55.
- YUAN J, LUO F G, CAO M C. Manufacture of a new type of I/O optical fiber array interconnection[J]. *Technol. Opt. Commun.*, 2004, (10): 53-55. (in Chinese)
- [5] 格雷戈里 T. A. 微传感器与微执行器全书[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- Gregory T A. *Micromachined transducers sourcebook* [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)

**作者简介:**梁静秋(1962—),女,辽宁沈阳人,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研究员,研究生导师,研究方向为微光机电系统及光通信。E-mail: liangjq@ciomp.ac.cn

侯凤杰(1980—),女,黑龙江肇东人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光学专业研究生。