

紫外写入条形光波导芯区折射率的测算

任一涛 黄寅 丁心仁 赵璐 汤毅

(云南大学物理科学技术学院, 云南 昆明 650091)

摘要 借助条形光波导输出模式场研究条形光波导芯区的折射率变化。通过采集条形光波导基模的输出光强度分布曲线,对比同条件下的条形光波导理论模式场强度分布,计算紫外写入条形光波导芯区的折射率及其变化。给出平面光波导掺锗摩尔分数约为 20% 时经紫外光照射后形成的条形波导,其芯区掺锗玻璃的折射率增大可达 1%~3%。

关键词 光波导; 折射率测量; 紫外写入; 模式场

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.s108006

Core Index Measurement and Calculation of the Ultraviolet-Written Optical Channel Waveguides

Ren Yitao Huang Yin Ding Xinren Zhao Lu Tang Yi

(School of Physical Science and Technology, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650091, China)

Abstract The index variation of channel waveguides based on a mode field distribution is studied. The measured mode field distributions are compared with the theoretical ones by acquiring the experimental field distributions of the fundamental mode. The core refractive index and its variations of ultraviolet (UV)-written channel waveguides are calculated. Waveguide channels are formed after the UV irradiation of planar waveguides and 1% ~ 3% index increase occurs in the waveguide core region containing about 20% germanium in mole fraction.

Key words optical waveguides; measurement of refractive index; ultraviolet writing; model field

OCIS codes 230.7380; 310.2785; 310.6860; 100.2960; 160.4670

1 引言

近年来通信信息传输容量不断提高,与光子技术相关的器件及其材料得到迅速的发展。作为集成光子器件的基本单元,条形光波导具有对光的局域二维约束性,为光的定向传播提供了通道,可便利地实现与光纤点对点间的耦合,达成信息的传输和切换。目前,制备条形介质光波导的方法有光刻/蚀刻法^[1]、离子交换法^[2]、离子注入法^[3]和紫外(UV)光写入法^[4,5]等,条形光波导横截面形状及其芯区周围包层折射率的分布决定了条形光波导的单模工作条件、模场半径、波导之间、波导和光纤间的耦合效率等影响光波导光传输特性的重要参数,确定条形光波导芯区的折射率大小和与周围包层的相对折射率差,对于制作高质量的光波导光子器件有重要的

实际意义。目前,用于测量平面玻璃薄膜折射率的方法主要有棱镜耦合法^[6]和椭圆偏振法^[7],测量光纤芯区折射率的方法主要有聚焦法^[8]和近场扫描法^[9]。对于用光刻/反应离子蚀刻法制作的条形光波导,在一般情况下其芯区材料的折射率数值往往可以在制作芯区波导层时,制作具有同样参数的一个测试片,通过测试后确定。而当使用 UV 光写入法或离子注入法制作条形光波导时,为获得较大的光入射功率和离子注入量,入射光束或离子束将被集中在很小的区域,导致平面光波导层中被照射或注入局部区域的材料折射率增大,形成条形光波导芯区。实际制作 UV 光写入光波导时,大多照射光源的功率有限,照射光束的强度和稳定性易受外界条件的干扰和影响,很难制作得到具有相同参数的

收稿日期: 2011-07-12; **收到修改稿日期**: 2011-09-19

基金项目: 国家自然科学基金(60867002)和云南省高校科技创新团队支持计划资助课题。

作者简介: 任一涛(1960-),男,博士,教授,主要从事光学、光波导及其器件、光纤和光电子技术等方面的研究。

E-mail: ytren@ynu.edu.cn

大面积平面光波导测试片,供常规折射率测试方法单独测量其折射率的大小。并且,为能用常规仪器测量薄膜的折射率,制作的光波导测试片无上包层。而用 UV 光写入法制作的条形光波导往往含有上包层。UV 光需要透过平面光波导的上包层照射波导层,这时的照射条件与照射无上包层的光波导有所不同;由照射 UV 光强度的不稳定带来的折射率变化尤其难于被检测。因而较为可行的办法只有借助光波导理论,通过实际测量和分析条形光波导模式的输出场分布推算光波导芯区经 UV 光照射后的实际折射率数值及其变化。

UV 光写入法是制作玻璃条形光波导的新方法之一,与需在超净室里进行的光刻、反应离子刻蚀的硅基光波导制作过程相比(保证条形光波导边缘陡直平滑尤其困难)^[1,10,11],UV 光写入法制作条形光波导的工艺较为简单、操作方便,改善了条形光波导芯区与包层的界面质量,得到的条形光波导的传输损耗较低。无论是用聚焦的连续 UV 激光光束照射平面光波导进行逐条制作的直接写入法^[12],还是借助制作在平面光波导表面上的掩模,通过 UV 光照射一次成形多条光波导或复杂光波导结构的 UV 曝光法^[5,13],均需要先制备最简单的三层平面光波导结构(三明治式)。该结构首先在单晶硅上淀积光波导下包层,然后在其上面制作光波导的波导层(掺锗的二氧化硅玻璃薄膜)和光波导上包层。通过对波导层掺锗(即 GeO₂),一方面提高波导层的折射率,另一方面借助掺杂在 SiO₂ 中的 Ge 对 UV 光的敏感性形成 UV 光敏层,使经 UV 光照射后局部掺锗二氧化硅玻璃的折射率得到显著增加,最终形成玻璃条形光波导^[14]。

2 光波导输出模式场的理论计算

对于实验中紫外写入型玻璃条形光波导来说,其波导结构横截面如图 1 所示。波导芯区周围的介质不相同,上下包层介质的折射率相同(折射率 $n_1 = n_2$),左右介质为掺锗玻璃(折射率为 n_3),波导芯区的折射率为 n_4 ,且 $n_1 < n_3 < n_4$ 。

当 UV 光照射平面光波导结构后,掺锗的平面波导层局部被照射区的折射率将增大,其增加量取决于平面波导层的掺锗量、样品的氢加载浓度和照射的 UV 光波长及强度。因此得到的矩形光波导芯区的折射率为 $n_4 = \beta n_3$, β 为芯区折射率增大倍数。

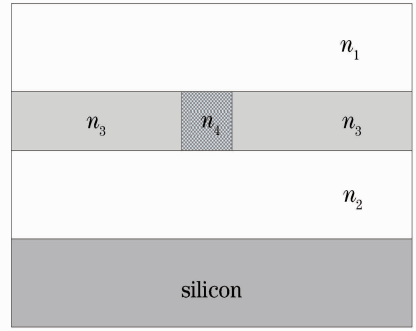


图 1 条形光波导的横截面结构图和各部分的折射率
Fig. 1 Cross-section of a channel waveguide and its index distribution

采用建立在 Marcatili 近似解析法^[15]基础上的有效折射率法^[16,17]来分析图 1 所示的 UV 写入条形光波导的模式场分布。在远离截止时,矩形介质波导中存在两类模式, E_{mm}^x 模和 E_{mm}^y 模, E_{mm}^x 的主要电磁场分量是 E_x 和 H_y ; E_{mm}^y 的主要电磁场分量是 E_y 和 H_x 。这时矩形波导芯区如图 2 所示,可被视为两个平板光波导的组合。其中图 2(b)所示的等效平面光波导波导层的折射率与图 2(a)所示的矩形光波导芯区的折射率 n_1 相同;图 2(c)所示的等效平面光波导波导层的折射率为图 2(b)中所示等效平面光波导的有效折射率 N_1 。

图 2(c)中 x 方向受约束的等效平面光波导的有效折射率数值由图 2(b)中 y 方向受约束的等效平面光波导决定, N_1 的数值为 $N_1^2 = n_1^2 - (k_y/k_0)^2$ 。一旦 N_1 的数值被确定,由图 2(c)中的等效平面光波导计算出的传播常数就是条形光波导图 2(a)的传播常数。对于 E_{mm}^x 模式,两个等效平板光波导的模式特征方程为

$$k_y w = -\arctan\left(\frac{k_y}{k'_{4y}}\right) - \arctan\left(\frac{k_y}{k'_{5y}}\right) + m\pi, \quad (1)$$

$$k_x t = -\arctan\left(\frac{k_x}{k''_{2x}} \frac{n_2^2}{n_1^2}\right) - \arctan\left(\frac{k_x}{k''_{3x}} \frac{n_3^2}{n_1^2}\right) + m\pi, \quad (2)$$

其中

$$k''_{2x} = k_0^2 (N_1^2 - n_2^2) - k_x^2, \quad (3)$$

$$k''_{3x} = k_0^2 (N_1^2 - n_3^2) - k_x^2. \quad (4)$$

由此出发即可通过编程计算出条形光波导支持的输出模式场。在给定图 2(a)所示的光波导工作波长、光波导截面各个区域的折射率分布后,计算得到条形光波导芯区的折射率增加时输出基模场沿 x 方向的分布曲线,如图 3 所示,用于 UV 光写入光波导折射率的测试对比计算。

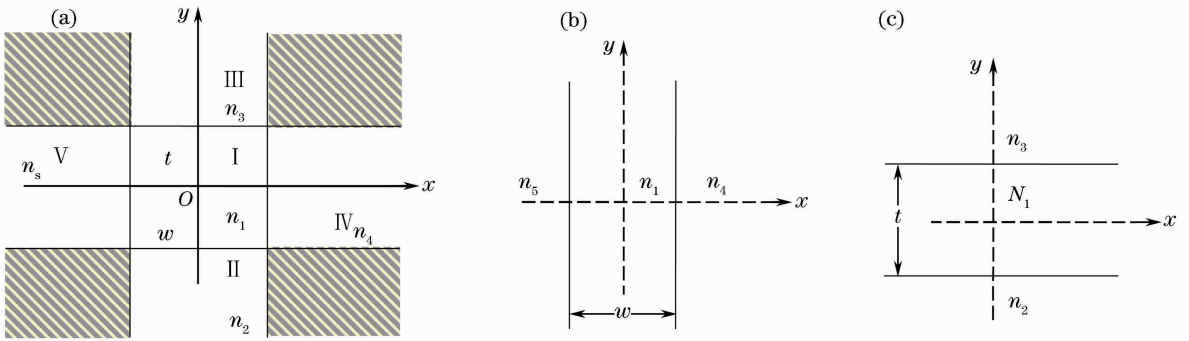


图 2 (a) 矩形条形光波导的有效折射率法示意图；(b) y 方向和(c) x 方向受约束的等效平面光波导

Fig. 2 (a) Diagram of effective index method for a cross-section channel waveguide and the equivalent planar waveguide confined in (b) y direction and (c) x direction

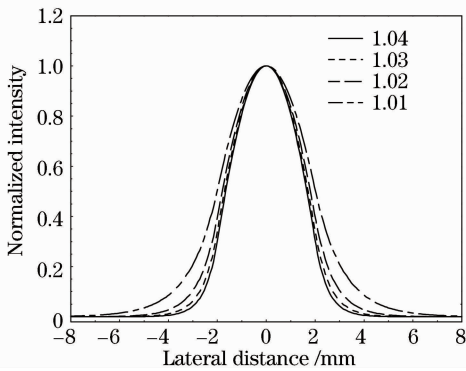


图 3 条形光波导芯区折射率增加时的理论基模场分布曲线

Fig. 3 Theoretical mode distribution corresponding to the core index increase of channel waveguides

3 光波导输出模式场分布的采集

搭建了如图 4 所示的模式采集系统,由此系统采集条形光波导输出模式的场分布。系统主要由光源、条形光波导芯片、光纤/波导耦合台、数字显微系统、滤波片和偏振片组成,数字图像最终采集到计算机。为简化系统和降低成本,采用 632.8 nm 波长氦氖激光作为输入光源,测量中条形波导芯片固定在耦合台上,借助显微镜进行入射光纤和条形波导间的耦合。

实验中,当使用不同芯区直径的入射光纤时,输出模式场受到包层模的影响不同。由图 1 可见,用普通单模光纤入射时,光波导输出的基模主光斑如图 5(a) 所示,它的上下位置出现了两块明显的亮斑。这是由于入射光纤的芯区直径约有 $10\ \mu\text{m}$,条形光波导样品的芯区宽度为 $10\ \mu\text{m}$,而其厚度只有约 $2.6\ \mu\text{m}$,较大的光纤芯区直径导致有部分入射光从光波导上下包层中漏出。将入射的光纤更换为芯区直径约为 $4\ \mu\text{m}$ 的特殊光纤,在相同的入射条件下得到如图 5(b) 所示的基模图像。这时基模图像只剩主光斑,包层模式得到很好的抑制,包层里的漏光基本消失。达到最佳耦合状态后,用数字显微系统便可采集条形光波导输出的被激发模式的最佳场分布图片。

对于工作在入射光波长下的多模条形光波导,改变光的入射条件,即增大入射光与光轴间的夹角,便可激发光波导所支持的高阶模式,得到如图 6 所示的一阶和二阶模的图像。通过控制耦合条件,可以使基模(E_{11})达到最佳耦合,从而有效地抑制高阶模式,降低高阶模对基模光场分布的影响,并借助高阶模在光波导中传播时的快速自然衰减,实现光波导仅输出基模。

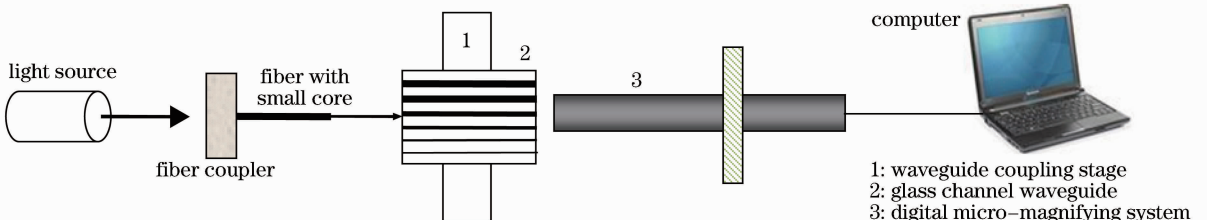


图 4 光波导输出模式场分布系统示意图

Fig. 4 Experimental setup to acquire mode profiles of a channel waveguide

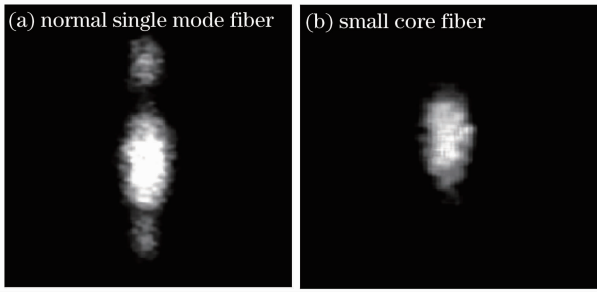


图 5 光波导输出基模光场典型图像

Fig. 5 Typical intensity profiles of the fundamental mode

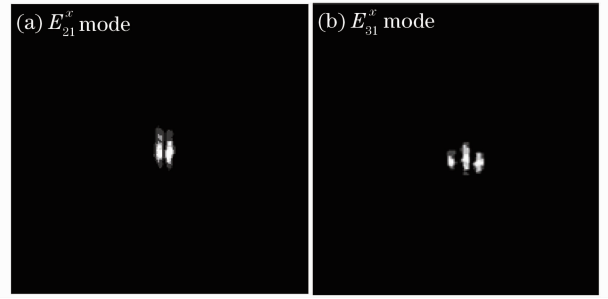


图 6 多模光波导输出的高阶模光场典型图像

Fig. 6 Intensity profiles of the higher order modes in a multimode waveguide

在取得光波导输出模式场的光强分布后,运用滤波方法消除在采集中产生的随机噪声。中值滤波是常用的一种非线性平滑滤波方法^[18],是一种领域运算,它把采用的窗口领域中像素的灰度按大小进行排序,选择该组数据的中间大小的值输出,作为该组窗口中心点的像素值。由于图像中与高频分量所对应区域边缘的灰度值变化较大且快,中值滤波可

有效地去除这些高频分量,消除孤立的噪声点,同时又减小图像的模糊,保留图像的细节。通过运用中值滤波方法对图像进行处理,先去除光强图上明显的噪声,使图像平滑,消除其对强度分布的干扰及对后续计算结果的影响。随后在实验中仔细矫正数字显微系统的放大倍数,最终得到的较佳输出基模光场及运用程序截取的强度分布曲线如图 7 所示。

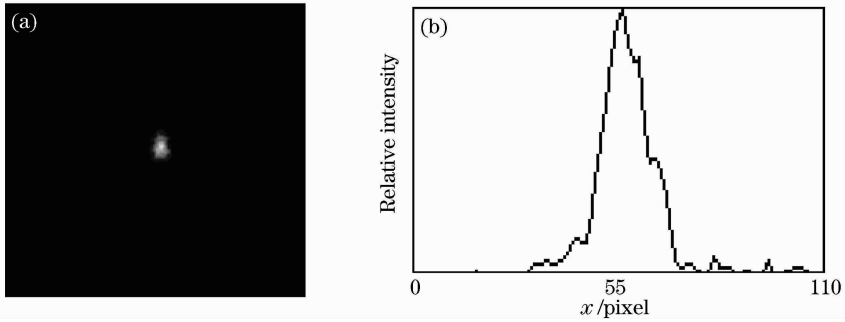


图 7 基模的光场图像(a)及取出的相应强度分布曲线(b)

Fig. 7 Intensity profile of the fundamental mode (a) and its distribution curve (b)

4 结果与讨论

为测算和比较不同实验条件下的光波导芯区折射率的变化或增加,采集了锆掺杂摩尔分数相同(约

为 20%),高压氢加载过程相同(13.5 MPa,室温下 30 d),UV 光照射量有所变化的多个光波导芯片(每片含有多个宽度的条形波导)上的不同条形波导

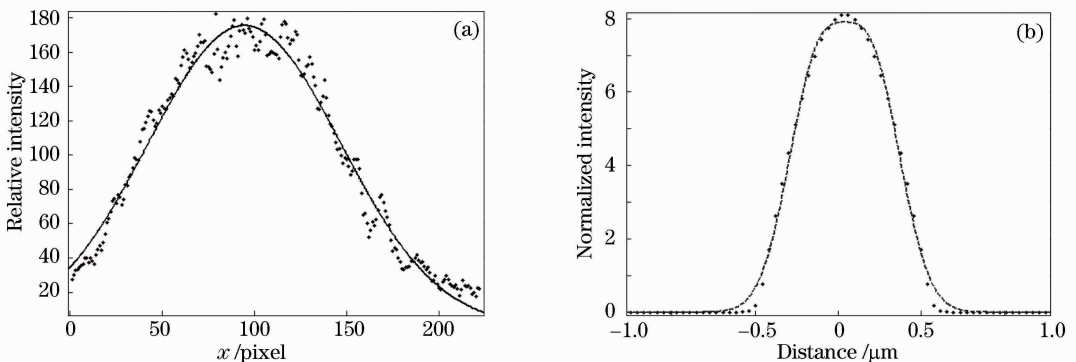


图 8 典型的条形光波导输出基模光场分布实验曲线(a)及与理论曲线间的比较(b)

Fig. 8 Experiment curve of the output mode (a) and the comparison with a theoretical one (b)

的输出基模场分布图。据此分别提取它们相应的基模场分布曲线,与理论计算出的基模场理论曲线进行比较,用最大残差法^[19]分析实验测试曲线和理论曲线之间的相似度,由最为吻合曲线得出经 UV 光照射后相应的条形光波导芯区折射率的大小,如图 8 所示。

实验中所用平面光波导上下包层的厚度各约为 $4\ \mu\text{m}$,波导层厚度约为 $2.6\ \mu\text{m}$ 。平面光波导由热氧化法和等离子体增强化学气相沉积(PECVD)法制备。用于照射平面光波导的 UV 光是 KrF 准分子脉冲激光器(波长为 $248\ \text{nm}$),平均 UV 曝光量为 $2000\ \text{mJ}/\text{cm}^2$ 和 $3000\ \text{mJ}/\text{cm}^2$,沿着掩模上条形光波导的方向移动光波导芯片直至整个芯片被曝光完毕。样品 1(宽度为 $10\ \mu\text{m}$ 和 $8\ \mu\text{m}$)和样品 2(宽度为 $10\ \mu\text{m}$)的平均紫外曝光量为 $2000\ \text{mJ}/\text{cm}^2$,样品 3(宽度为 $10\ \mu\text{m}$)的平均 UV 曝光量为 $3000\ \text{mJ}/\text{cm}^2$ 。计算得到的不同条形光波导芯区折射率增加的数据如表 1 所示。

表 1 最大残差值与光波导芯区折射率的增加值

Table 1 Index increase in the different channel waveguides

Times of index increase	Width of waveguide channel / μm			
	Sample 1		Sample 2	Sample 3
	10	8	10	10
1.01	9.2506	9.9387	7.2450	73.6708
1.02	6.7347	6.0624	9.9637	43.8709
1.03	10.1175	9.4282	13.4158	5.4457

表 1 给出了由一系列不同芯区折射率的理论曲线图(折射率的增大从 1.01 到 1.03)中取出的数据与实验曲线图的数据进行拟合计算,根据最大残差系数得知拟合的实验曲线与哪条理论曲线最为接近,从而得出实际光波导样品芯区的折射率的大小。由表 1 中样品 1 的数据可以看出,经相同 UV 光量照射后,芯区宽度分别为 $8\ \mu\text{m}$ 和 $10\ \mu\text{m}$ 的条形光波导芯区的折射率均增大到 1.02 倍(残差数值最小)。它们在同一芯片上,经历基本相同的制备过程,具有基本相同的制备条件和参数,因而它们的芯区具有基本相同的折射率。尽管样品 2 和样品 1 的 UV 曝光量相同,但最终形成的条形光波导的芯区折射率彼此有差异(芯区折射率均增大到 1.01 倍),样品 2 的芯区折射率增加比样品 1 小。这是由于在氢加载时,样品个体对氢分子的吸收量不同;并且样品在 UV 曝光过程中,其中的氢分子逸出量也不同,造成样品对 UV 光吸收的灵敏度不同,最终导致不同样品对 UV 光引起的折射率变化有差异。在光波导制备条件基本相同时,增大 UV 光照射强

度,可以造成条形光波导芯区折射率有更大的增加,如样品 3 的芯区折射率增大到 1.03 倍。

5 结 论

对 KrF 准分子脉冲激光器照射后制备的玻璃条形光波导输出光场进行了分析,通过采集其输出基模图像,提取输出基模光场光强度分布曲线,与理论曲线进行比较分析,计算出经 UV 光照射平面光波导后,在平面光波导波导层中被照射区域引起的折射率增加量,得到当波导层掺锗摩尔分数约为 20%时,经高强度 UV 曝光后,照射区域玻璃的折射率可增大至 3%,形成玻璃条形光波导芯区。

参 考 文 献

- 1 F. Ladouceur, J. D. Love. Silica-Based Buried Channel Waveguides and Devices[M]. London: Chapman & Hill, 1996
- 2 I. P. Kamionw, J. R. Carruthers. Optical waveguiding layers in LiNbO_3 and LiTaO_3 [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1973, **22**(7): 326~328
- 3 R. G. Wilson, G. R. Brewer. Ion Beams[M]. New York: Wiley, 1973
- 4 K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson *et al.*. Photosensitivity in optical fibre waveguides: application to reflection filter fabrication [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **32**(10): 647~649
- 5 Yitao Ren, Carl Johan, Jesper Arentoft. Thermally poled channel waveguides with polarization-independent electrooptic effect [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(5): 639~641
- 6 P. K. Tien, R. Ulrioh. Theory of prism-film coupler and thin film light guides [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1970, **60**(10): 1325~1337
- 7 Huang Zuohua, He Zhenjiang. The optical methods for measuring the thickness and refractive index of thin films [J]. *Modern Scientific Instruments*, 2003, **13**(4): 43~44
黄佐华,何振江. 测量薄膜厚度及其折射率的光学方法 [J]. *现代科学仪器*, 2003, **13**(4): 43~44
- 8 Y. Kokubun, K. Iga. Precise measurement of the refractive index profile of optical fibers by a nondestructive interference method [J]. *Trans. IEICE Jpn.*, 1977, **5**(60): 702~707
- 9 M. J. Saunders. Optical fiber profiles using the refracted near-field technique: a comparison with other methods [J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(9): 254~256
- 10 K. Masao. Silica waveguides on silicon and their application to integrated optic components [J]. *Opt. & Quantum Electron.*, 1990, **22**(5): 391~416
- 11 S. Valette. State of the art of integrated optics technology at LETI for achieving passive optical components [J]. *J. Mod. Opt.*, 1988, **35**(6): 993~1005
- 12 M. Svalgaard, C. V. Poulsen, A. Bjarklev *et al.*. Direct UV-writing of buried single mode channel waveguides in Ge-doped silica films [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(17): 1401~1402
- 13 Wu Yuanda, Xia Junlei, An Junming *et al.*. Fabrication of optical waveguide devices with UV-writing technology [J]. *Chinese J. Semiconductors*, 2006, **27**(4): 744~746
吴远大,夏君磊,安俊明等. 紫外写入技术制备光波导器件研究 [J]. *半导体学报*, 2006, **27**(4): 744~746
- 14 S. D. Kelly, S. I. George, P. G. Barrett *et al.*. Photosensitivity of sol gel derived germanosilicate planar

- waveguides[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(1): 25~27
- 15 E. A. J. Marcatili. Dielectric rectangular waveguide and directional coupler for integrated optics[J]. *Bell Syst. Technol. J.*, 1969, **48**(21): 2071~2102
- 16 K. Okamoto. *Fundamentals of Optical Waveguides*[M]. New York: Academic Press, 2000
- 17 K. Chiang. Analysis of the effective-index method for the vector modes of rectangular-core dielectric waveguides [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1996, **44**(5): 692~700
- 18 Xing Cangju, Wang Shoujue, Deng Haojiang *et al.*. A new filtering algorithm based on extremum and median value[J]. *J. Image and Graphics*, 2001, **6**(6): 533~536
邢藏菊,王守觉,邓浩江 等. 一种基于极值中值的新型滤波算法[J]. *中国图像图形学*, 2001, **6**(6): 533~536
- 19 Liu Zhimin. *The Modern Uncertainty Method and Applications* [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1977
刘智敏. *现代不确定度方法与应用*[M]. 北京: 中国计量出版社, 1997

栏目编辑: 何卓铭