

脊形波导传输损耗理论分析

温昌礼 季家镛 窦文华 冯向华 宋艳生

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 新一代计算机光互连普遍采用的垂直腔面发射激光器 (VCSEL), 是波长为 850 nm 的多模激光器。为了更好地与其匹配, 需要开发截面大小与其输出面大小接近的脊形波导。在成功制备了最小截面积 $70\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$, 直线长度 21 cm 聚硅氧烷脊形波导的基础上, 对其损耗机制进行了理论分析。利用微扰理论分析可知吸收损耗可以忽略不计, 主要损耗由上下表面和侧面粗糙度引起的表面散射损耗决定。利用变分原理和有限元方法分析了气泡、缺陷和杂质对场分布的影响, 得出了基模和 1 阶模受到肉眼可辨的影响和发生跃变时气泡、缺陷或杂质的具体量值。利用 CCD 摄像法测量传输损耗, 实验结果与理论结果基本相符。

关键词 集成光学; 传输损耗; 微扰法; 表面散射

中图分类号 TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0313001

Theoretical Analysis of Propagation Loss of Rib Waveguide

Wen Changli Ji Jiarong Dou Wenhua Feng Xianghua Song Yansheng

(College of Opto-Electronics Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) is widely used in the interconnection of new-generation computer, which is a multi-mode laser with the wavelength at 850 nm. A rib waveguide with section area similar to the output plane needs to be developed to fit VCSEL better. Based on the successful preparation of polysiloxane rib waveguide, which has the smallest area of $70\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ and straight length of 21 cm, theoretical analysis of its loss mechanism is processed. By using perturbation theory, it is concluded that the absorption of material can be neglected and the main loss of scattering comes from the loss of surface scattering induced by the roughness of top surface, bottom surface and side surface. By using variational principle and finite element method, the field distribution influenced by bubble, defect and impurity is analyzed. Concrete measured value of bubble, defect and impurity at saltus, visible influence of basic mode and first-order mode is gotten. Transmission loss measured by CCD photography shows that experimental results fit the theoretical results well.

Key words integrated optics; propagation loss; perturbation method; surface scattering

OCIS codes 130.0130; 130.2755; 130.3120; 130.3750

1 引言

目前高速芯片间的光互连, 需要光的高速通道, 而最便于集成的互连通道为脊形波导, 但目前最高速的垂直腔面发射激光器 (VCSEL), 是工作波长为 850 nm 的多模激光器。本文采用聚硅氧烷作为波导材料^[1], 研制出截面为 $70\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$, 直线长度达 21 cm 的脊形波导, 并成功实现了通光和无损伤损耗测量。1988~2000 年, 马春生等^[2~11]为脊形波导的研究奠定了基础。2001~2007 年, 魏红振等^[12~18]研究了分析脊形波导的各种方法, 更加深入

地研究了其各种损耗机制。2008~2010 年, Shih 等^[19~23]继续研究了脊形波导的损耗理论及制备。近年来国内关于脊形波导的理论研究, 主要集中在模场分布、弯曲损耗和结构优化等方面。而对于表面散射损耗, 虽然很早就有研究, 但对于脊形波导散射损耗分析的报道很少。本文结合瑞利散射原理和有效折射率法, 利用有效折射率法的等效模型, 将横向和纵向分开单独分析, 提出了分析脊形波导表面散射损耗的方法, 成功分析了本文研制脊形波导结构的散射损耗。同时, 利用微扰法分析了脊形波导

收稿日期: 2010-06-08; **收到修改稿日期**: 2010-11-02

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z2a5)资助课题。

作者简介: 温昌礼(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事专业为光学工程方面的研究。E-mail: wcl100@163.com

导师简介: 季家镛(1946—), 男, 教授, 主要从事专业为光电技术方面的研究。E-mail: jijiarong@hotmail.com

的吸收损耗。最后介绍了利用变分原理和有限元方法分析气泡、缺陷和杂质对模场分布的影响,并进行了实验验证。

2 微扰法分析吸收损耗

脊形波导的各介质层均为弱吸收介质,其复折

射率为

$$\hat{n}_i = n_i - j\kappa_i, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

式中 1 代表芯层,2 代表基底,3 代表覆盖层。

因 κ_i 为小量,可把 $-j\kappa_i$ 视为介质是折射率 n_i 的虚增量,最后得到^[2]:

$$L_i = \frac{n_1}{N_i} \left\{ \kappa_1 - \frac{n_1^2 - N_i^2}{n_1} \frac{\frac{n_1 \kappa_1 - n_2 \kappa_2}{(n_1^2 - n_2^2)(N_i^2 - n_2^2)^{1/2}} + \frac{n_1 \kappa_1 - n_3 \kappa_3}{(n_1^2 - n_3^2)(N_i^2 - n_3^2)^{1/2}}}{k_0 b_i + (N_i^2 - n_2^2)^{-1/2} + (N_i^2 - n_3^2)^{-1/2}} \right\}, \quad (i = 1, 2) \quad (2)$$

$$\Delta N = \frac{N_1}{N} \left\{ L_1 - \frac{2(N_1^2 - N^2)}{N_1} \frac{\frac{N_1 L_1 - N_2 L_2}{(N^2 - N_2^2)^{1/2}} + 2(N^2 - N_2^2)^{1/2} \left(\frac{L_1}{N_1} - \frac{L_2}{N_2} \right)}{k_0 a \left[\frac{N_2^2}{N_1^2} (N_1^2 - N^2) + \frac{N_1^2}{N_2^2} (N^2 - N_2^2) \right] + \frac{2(N_1^2 - N_2^2)}{(N^2 - N_2^2)^{1/2}}} \right\}. \quad (3)$$

式中 N 为波导总的有效折射率, N_1 为芯层厚度为脊形波导脊高的等效波导的有效折射率, N_2 为芯层厚度为脊形波导薄层厚度的等效波导的有效折射率。吸收损耗系数为

$$\alpha = 2k_0 \Delta N. \quad (4)$$

详细求解过程请参考文献[1]。覆盖层和基底材料的吸收系数 $\alpha_1 = \alpha_3 = 0.001 \text{ cm}^{-1}$, 芯层的吸收系数 $\alpha_2 = 0.002 \text{ cm}^{-1}$ (虽然芯层吸收系数更大,但因为芯层折射率必须大于基底和覆盖层,所以材料不能交换使用)。波导的结构参数为脊宽 $a = 70 \text{ }\mu\text{m}$, 脊高 $b_1 = 51 \text{ }\mu\text{m}$, 薄层厚度 $b_2 = 1 \text{ }\mu\text{m}$, 覆盖层和基底折射率为 1.41, 芯层折射率为 1.543, 工作波长为 850 nm。

将以上参数代入(2),(3)和(4)式,可得 $\Delta N = 1.35284 \times 10^{-10}$ 。总的损耗系数为 $\alpha = 2.00003 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1} = 8.60013 \times 10^{-3} \text{ dB/cm}$, 可见吸收损耗为一小量,一般可以忽略不计。

3 瑞利散射原理分析散射损耗

平板波导的散射损耗系数的瑞利表达式为

$$\alpha_s = A^2 \left(\frac{1}{2} \frac{\cos^3 \theta}{\sin \theta} \right) \left(\frac{1}{w + 1/p + 1/q} \right), \quad (5)$$

式中 θ 是锯齿形光线在界面上的入射角, w 为导波层厚度, $1/p$ 与 $1/q$ 各为上、下界面的穿透深度。(5)式中的 A 为

$$A = \frac{4\pi}{\lambda_1} (\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2)^{1/2}, \quad (6)$$

式中 $\lambda_1 = \lambda_0/n_1$ 是薄膜介质中的光波长, λ_0 为真空中的波长, σ_{12} 和 σ_{13} 各为两界面相对平均位置起伏 x 的方差,代表粗糙度[变量 x 的方差的定义为 $\sigma^2 = \overline{x^2} - (\bar{x})^2$, 即 x^2 的统计平均值与 x 的统计平均值的

平方之差]。

将(6)式的应用范围进行扩展,根据等效折射率,脊形波导可以最终等效为一个平板波导。脊形波导在平板波导方向的散射损耗可以等效为此平板波导的散射损耗。因此,如果将脊形波导分开为 x , y 两个方向分别等效为独立的平板波导,此两个平板波导的散射损耗分别代表了脊形波导两个方向的散射损耗。因此,最后总的散射损耗为这两个方向的散射损耗之和,即

$$\alpha_s = \alpha_{xs} + \alpha_{ys}. \quad (7)$$

4 脊形波导的表面散射损耗分析

如图 1 所示为折射率法常用的 y 方向等效平板波导的模型。利用等效折射率法可得

$$N_1 = 1.54298, \quad N_2 = 1.51488.$$

利用瑞利散射原理可得

$$\sin \theta = 0.999998, \quad \cos \theta = 0.001851,$$

$$p = q = \sqrt{\beta^2 - N_i^2 k_0^2} = 2.166736 \times 10^6 \text{ cm}^{-1},$$

$$d_{\text{eff}} = a + 1/p + 1/q = 7.092305 \times 10^{-3} \text{ cm}.$$

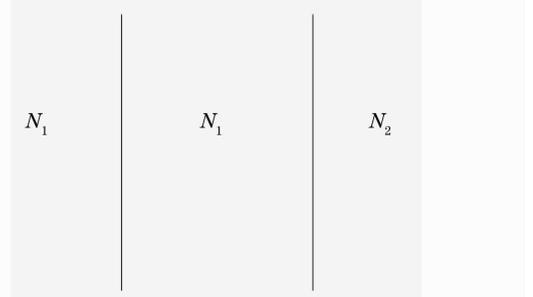


图 1 y 方向等效平板波导示意图

Fig. 1 Photo of equivalent slab waveguide at y direction

令

$$\sigma_{12} = \sigma_{13} = \sigma = 0.154201 \mu\text{m},$$

可得

$$\alpha_{\text{ys}} = 0.046512 \text{ cm}^{-1} = 0.2 \text{ dB/cm}.$$

作为光通信要求损耗可以最大为 1 dB/cm, 假定

$$\alpha_{\text{ys}} = 0.232558 \text{ cm}^{-1} = 1 \text{ dB/cm},$$

可得

$$\sigma_{12} = \sigma_{13} = \sigma = 0.34480 \mu\text{m}.$$

图 2 为 x 方向的等效平板波导, 同 y 方向的计算方法类似, 令 $\sigma_{12} = \sigma_{13} = \sigma = 0.042778 \mu\text{m}$, 可得 $\alpha_{\text{rs}} = 0.046512 \text{ cm}^{-1} = 0.2 \text{ dB/cm}$. 作为光通信要求损耗最大为 1 dB/cm, 假定 $\alpha_{\text{rs}} = 0.232558 \text{ cm}^{-1} = 1 \text{ dB/cm}$, 可得 $\sigma_{12} = \sigma_{13} = \sigma = 0.095654 \mu\text{m}$.

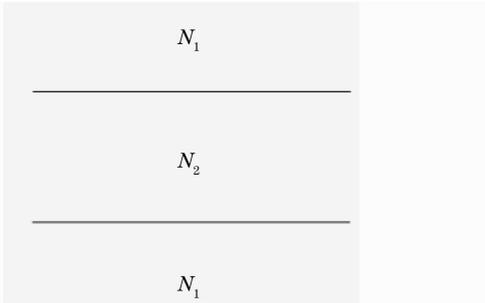


图 2 x 方向等效平板波导示意图

Fig. 2 Diagram of equivalent slab waveguide at x direction

综上所述, 对比顶部和底部以及侧壁的粗糙度和损耗的数值, 上下表面的粗糙度为 $0.0957 \mu\text{m}$ 即可引起 1 dB/cm 的损耗, 而侧壁则需要 $0.3448 \mu\text{m}$ 的粗糙度才能引起这么大的损耗。可见相同粗糙度侧壁引起的损耗远小于上下表面引起的损耗, 本文研究的脊形波导表面散射损耗, 主要由顶部和底部的粗糙度引起。而侧壁粗糙度引起的表面散射损耗相对来说比较小。

5 气泡、缺陷和杂质对场分布的影响

用变分原理分析气泡、缺陷和杂质对场分布的影响如下式所示:

$$\delta\beta^2 = k_0^2 \Delta(n^2) \frac{\oint \psi^2 ds}{\oint \psi^2 ds}, \quad (8)$$

式中 $\delta\beta^2$ 代表传播常数的变化量, $\Delta(n^2)$ 代表折射率的变化量, 分子代表场强度分布在折射率变化占整个场强度分布的比例。将气泡、缺陷和杂质在横截面的折射率分布, 看成是 (8) 式中的 $\Delta(n^2)$ 。利用 (8) 式的变分原理, 算出 $\delta\beta^2$, 最后通过有限元方法反

解亥姆霍兹方程, 得出对场分布的影响。在基模均匀分布的情况下, 只要保证气泡、缺陷和杂质的截面积不超 $0.8690 \mu\text{m}^2$, 就不会使基模场分布出现明显变化。气泡、缺陷和杂质对基模的损伤程度, 取决于其所处的位置和基模的功率分布情况。当气泡、缺陷和杂质的截面积超过 $1.3398 \mu\text{m}^2$ 之后, 基模将直接变成 10 阶模或更高阶的模式。即此时不存在基模, 只有阶 10 模以及更高阶的模式存在于波导中。而对于 1 阶模, 如果气泡、缺陷和杂质的截面积达到 $4.3449 \times 10^{-7} \mu\text{m}^2$, 肉眼就能观察到模场出现非对称性。当气泡、缺陷和杂质的截面积超过 $1.1848 \mu\text{m}^2$ 时, 10 阶模就会跃变为 01 阶模或更高阶模。可见, 高阶模对于气泡、缺陷和杂质是比较敏感的。

6 实验验证

图 3 为测量系统实物图, 采用 CCD 摄像法^[24,25], 光纤直接耦合的方式, 如图 4 所示, 成功实现了波导的通光和无损测量(如图 5 所示)。通过多次测量取平均值, 得出波导的损耗为 0.18 dB/cm。实验结果表明, 总损耗测量值和理论分析结果为同一量级, 基本符合。但由于测量误差的存在, 以及其它损耗的存在, 理论结果和测量结果存在着差异。同时, 采用分光光度计测量材料的透射率函数, 最终

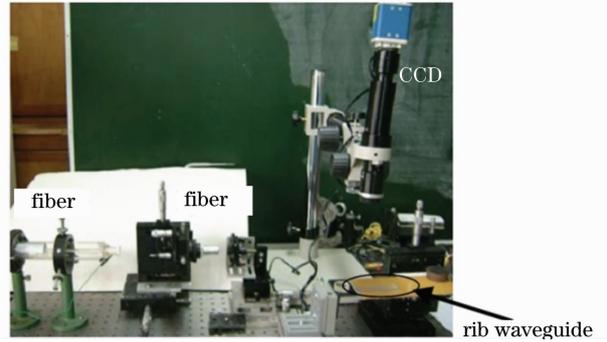


图 3 测量系统实物图

Fig. 3 Photo of measuring system

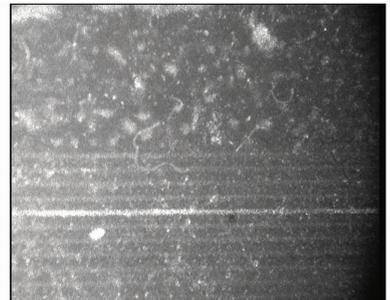


图 4 CCD 所拍光场分布图

Fig. 4 Light distribution by CCD

得到材料的本征吸收损耗约为 0.02 dB/cm。测量值与理论计算值 0.009 dB/cm 相比略微偏大,这是由于测量过程不可避免的会引入其它损耗,但在数量级上二者基本一致。据此也可推断出实际本征吸收损耗在 0.009~0.02 dB/cm 之间。

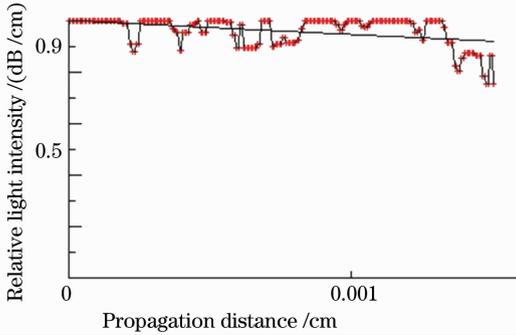


图 5 CCD 曲线拟合分析结果

Fig. 5 Analysis results of curve fitting

7 结 论

本文分析了多模脊形波导的各种主要损耗机制和原理。将传统的瑞利散射原理和有效折射率法结合,得出散射损耗主要由上下表面的粗糙度引起,侧壁的粗糙度相对较小。利用变分原理和有限元方法,分析得出气泡、缺陷和杂质对模场分布的影响。理论分析结果和实验结果在量级上基本符合。

参 考 文 献

- Wen Changli, Ji Jiarong, Dou Wenhua *et al.*. Polymer material for optical waveguide used in integrated circuit[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(7): 36~40
温昌礼, 季家镛, 窦文华 等. 集成电路用聚合物光波导材料[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(7): 36~40
- Ma Chunsheng, Liu Shiyong. Analysis and computation on mode propagation and loss in ridge waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 1989, **9**(1): 38~42
马春生, 刘式埔. 脊形波导中导模传输与损耗的分析与计算[J]. *光学学报*, 1989, **9**(1): 38~42
- Liu Yuliang, Liu Enke. Mode characteristic and plasma dispersion effect of rib silicon waveguides with trapezoidal cross section[J]. *Acta Optica Sinica*, 1991, **11**(8): 727~732
刘育梁, 刘恩科. 梯形截面硅脊形波导的模式特性及其等离子体色散效应[J]. *光学学报*, 1991, **11**(8): 727~732
- Zhao Cezhou, Liu Enke, Li Guozheng. Fabrication of SOI single-mode rib waveguide with large trapezoidal cross-section[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(7): 783~784
赵策洲, 刘恩科, 李国正. SOI 梯形大截面单模脊形波导的研制[J]. *光学学报*, 1994, **14**(7): 783~784
- Zhao Cezhou, Liu Enke, Zheng Yuxiang *et al.*. Fabrication of all-silicon ridge waveguide with rectangular cross-section and its loss analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(10): 1054~1058
赵策洲, 刘恩科, 郑玉祥 等. 全硅矩形截面脊形波导的研制及其损耗分析[J]. *光学学报*, 1994, **14**(10): 1054~1058
- Pan Ji, Zhao Honglin, Yang Enze. The results of 3-D simulation and measurement for silicon single-mode rib optical waveguide

- [J]. *Research & Progress of SSE*, 1995, **15**(1): 84~88
潘 妮, 赵鸿麟, 杨恩泽. 硅单模脊形光波导的三维模拟及实测结果[J]. *固体电子学研究与进展*, 1995, **15**(1): 84~88
- Li Guozheng, Liu Shuping. The study of $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ Heterostructures rib waveguide structural parameter[J]. *The Journal of Semiconductors*, 1996, **21**(4): 1~3
李国正, 刘淑平. $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 异质结脊形光波导结构参数的研究[J]. *半导体杂志*, 1996, **21**(4): 1~3
- Zhao Cezhou, Liu Enke. Mode characteristics of rib multiple quantum well waveguides with trapezoidal cross-section[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1996, **25**(1): 46~49
赵策洲, 刘恩科. 梯形截面多量子阱脊形波导模式特性[J]. *光子学报*, 1996, **25**(1): 46~49
- Li Baojun, Liu Enke. Optimum structure of $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ ridge waveguides[J]. *Semicond. Optoelectron.*, 1997, **18**(1): 34~38
李宝军, 刘恩科. $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 脊形光波导的最佳结构[J]. *半导体光电*, 1997, **18**(1): 34~38
- Liu Shuping, Jia Yuehu. The analysis and design of $\text{Ge}_{0.05}\text{Si}_{0.95}/\text{Si}$ rib waveguide[J]. *J. Test and Measure. Technol.*, 1999, **13**(1): 59~62
刘淑平, 贾跃虎. $\text{Ge}_{0.05}\text{Si}_{0.95}/\text{Si}$ 脊形光波导的分析及设计[J]. *测试技术学报*, 1999, **13**(1): 59~62
- Shi Bin, Jiang Zuimin, Wang Xun. Structure and design of new low loss SiGe optical waveguide[J]. *Chinese J. Semicond.*, 1999, **20**(10): 894~899
施 斌, 蒋最敏, 王 迅. 一种低损耗 SiGe 脊形光波导的结构和设计[J]. *半导体学报*, 1999, **20**(10): 894~899
- Wei Hongzhen, Yu Jingzhong, Zhang Xiaofeng *et al.*. Simple method for estimating minimum bend radii of SOI single mode curved rib waveguides[J]. *J. Infrared Millimeter Waves*, 2001, **20**(5): 398~400
魏红振, 余金中, 张小峰 等. 估算 SOI 单模脊形弯曲波导最小弯曲半径的简单方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2001, **20**(5): 398~400
- Jin Yongxing, Xu Jiangfeng, Wang Jianfeng. Finite difference method for rib waveguide analysis[J]. *J. China Institute of Metrology*, 2003, **14**(2): 114~116
金永兴, 徐江峰, 王剑锋. 脊形波导有限差分法分析[J]. *中国计量学院学报*, 2003, **14**(2): 114~116
- Liu Jingwei, Chen Shaowu, Yu Jinzhong. A method for analyzing the coupling of 3-D tapered rib waveguides with fibers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(1): 6~11
刘敬伟, 陈少武, 余金中. 一种分析三维楔脊形光波导与光纤耦合的方法[J]. *物理学报*, 2005, **54**(1): 6~11
- He Zhongjiao. Analysis of stress birefringence for silica waveguide on silicon and SOI rib waveguide[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(2): 201~204
何忠蛟. 硅基二氧化硅波导和 SOI 脊型波导应力双折射研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(2): 201~204
- Martin Schnarrenberger, Lars Zimmermann, Torsten Mitze *et al.*. Low loss star coupler concept for AWGs in rib waveguide technology[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(23): 2469~2471
- Lu Rongguo, Liu Yongzhi, Liao Jinkun *et al.*. Bending loss study of polymeric S-shape rib waveguide [J]. *Semicond. Optoelectron.*, 2007, **28**(5): 638~750
陆荣国, 刘永智, 廖进昆 等. 有机聚合物 S 形脊波导的弯曲损耗研究[J]. *半导体光电*, 2007, **28**(5): 638~750
- Delong Zhang. Comment on Demonstration of net gain at 1550 nm in an erbium-doped polymer single mode rib waveguide [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(10): 106101-1~106101-3
- Chih T' sung Shih, Zhi Wei Zeng, Yin Cheng Chang *et al.*. Optical design of bent rib waveguide with MOS cross-section[J]. *Opt. Rev.*, 2009, **16**(4): 413~415
- Jack Sheng Kee, Daniel Puiu Poenar, Pavel Neuzil *et al.*. Design

- and fabrication of poly (dimethylsiloxane) single-mode rib waveguide[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(14): 11739~11746
- 21 Hong Jianxun, Xu Kai, Zhou Limin *et al.*. Tapers in electro-optic polymer waveguides[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2686~2691
洪建勋, 徐凯, 周立民等. 电光聚合物波导中的锥形结构[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2686~2691
- 22 Ee Jin Teo, Andrew A. Bettiol, Boqian Xiong *et al.*. An all-silicon, single-mode Bragg cladding rib waveguide [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(9): 8816~8823
- 23 Liao Jinkun, Li Heping, Tang Xiongui *et al.*. Operator expansion analysis of Mach-Zehnder waveguide in polymeric electro-optic modulators[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1597~1602
- 廖进昆, 李和平, 唐雄贵等. 聚合物电光调制器中马赫-曾德尔波导的算子展开法分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1597~1602
- 24 Jiang Yi, Cao Zhuangqi, Chen Yingli. CCD camera photographing in detecting the propagation attenuate coefficient of polymer waveguides [J]. *J. Shanghai Jiaotong University*, 1997, **31**(10): 42~44
蒋毅, 曹庄琪, 陈英礼. CCD 摄像法测量有机聚合物光波导传输损耗[J]. *上海交通大学学报*, 1997, **31**(10): 42~44
- 25 Jiang Yi, Cao Zhuangqi, Qiu Linlin *et al.*. Digital measurements and fabrication of low loss optical organic polymer waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(8): 1142~1145
蒋毅, 曹庄琪, 仇琳琳等. 低损耗有机聚合物光波导的制备及其数字化测量技术[J]. *光学学报*, 1999, **19**(8): 1142~1145