

文章编号: 0253-2239(2010)s100302

玻璃基离子交换型多模光功分器研究

向 微 郑伟伟 江舒杭 杨建义 江晓清 郝寅雷 王明华*

(浙江大学信息学院信息与电子工程学系 微电子与光电子研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要 采用离子交换工艺,对多模波导的制作和应用进行了探索。工艺过程一次交换采用银钠离子交换,二次交换采用无源的电场辅助交换。首先通过控制银离子浓度和交换过程的温度与时间成功制作了宽度和深度可控的条波导。然后在此基础上采用 3D-BPM 的方法进行模拟并设计了 Y 分叉型和多模干涉型的 1×2 功分器以验证波导的制作工艺的可行性。经过 1550 nm 通光损耗测试,条波导损耗小于 0.28 dB/cm,功分器插入损耗达到 3.6 dB,均匀性达到 0.21 dB。分析表明,这种光波导制备技术参数可控,且重复性好,可用于低损耗光功分器件的制作。

关键词 集成光学;多模功分器;离子交换;多模干涉;玻璃

中图分类号 TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201030.s100302

Study of Ion-Exchanged Glass-Based Multimode Optical Power Splitter

Xiang Wei Zheng Weiwei Jiang Shuhang Yang Jianyi

Jiang Xiaoqing Hao Yinlei Wang Minghua

(*Institute of Microelectronics and Optoelectronics, Department of Information Science and Electronics Engineering, Faculty of Information Technology, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China*)

Abstract The research was made in fabrication and application of multimode waveguides using the $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$ ion-exchange technique in glass. First, $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$ ion exchange was run in nitrate melt. Then a electric field was applied. By using this method it is possible to control independently the width and depth of the waveguide. Three-dimensional beam propagation method (3D-BPM) was utilized to simulate and design power splitters with multimode interference (MMI) structure and Y-junction. The measurement results with 1550 nm light showed that the measured loss of multimode straight waveguide can be lower than 0.28 dB/cm, and the insertion loss was 3.6 dB, and uniformity of the splitters was 0.21 dB. It is proved that the fabrication process was adjustable with parameters and reliable on repeatability, which makes it suitable for optical power splitters with high performance.

Key words integrate optics; optical power splitter; ion-exchange; multimode interference (MMI); glass

OCIS codes 220.4000; 230.0230; 230.3120; 230.7380

1 引 言

在光纤通信中,单模光纤(SMF)的优势在于它可以支持高速应用技术以及远距离应用,目前偏振模色散的缓解技术与补偿技术动态地结合运用是解决高速率长距离传输的发展方向^[1],但 300 m 以内的 10 Gb/s

传输链路目前依然是多模光纤(MMF)的领地。多模光纤尽管模间色散大,但其具有光纤芯径粗、数值孔径大、安装容差大、能从光源耦合更多的光功率等优点,广泛用于楼宇等小规模的光网络^[2]。近年来多模光纤更是有了很多新的应用,例如构成温度传感器^[3]等。

收稿日期: 2010-06-01; **收到修改稿日期**: 2010-08-30

基金项目: 国家 973 计划(2007CB613405)、国家自然科学基金(60777015)、浙江省科技厅科技计划项目(2007C21022)和浙江大学青年教师交叉研究种子基金(188020)资助课题。

作者简介: 向 微(1986—),女,硕士研究生,主要从事集成光学玻璃基器件方面的研究。E-mail: zjuweixiang@gmail.com

导师简介: 王明华(1942—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事集成光学方面的研究。E-mail: wangmh@zju.edu.cn (通信联系人)(中国光学学会会员)

在多模通信系统中,光功分器用来实现光信号的功率分配,在光路连接,光方向控制,各器件之间的耦合控制等方面,是不可缺少的无源光器件。多模光纤耦合器可用集成光学技术和微光学等方法制作,已有拼接型、熔融拉锥型、平面光波导型和混合棒型等不同的类型。其中平面波导型具有更好的均分性,较小的外形尺寸和较低的波长敏感度。在器件的制作方法上,离子交换已成为生产玻璃光功分器和其他光学器件的重要技术,不仅工艺简单,造价低廉,而且易与光纤折射率匹配,易于系统集成。

基于自镜像效应(SIE)的多模干涉型(MMI)光耦合器^[4]的应用日益广泛,其具有低的插入损耗,功率离散小,对偏振不敏感,且制作容差性好,工艺简单,结构紧凑。基于 MMI 结构的功分器相对于树枝状的 Y 分支结构,在分光路数增加的时候更能避免器件尺寸过大,以及多级级联造成性能下降等问题。类似于单模的 MMI 型耦合器一样,多模的耦合器也一样可以用 MMI 的结构来完成^[5]。

对于 MMI 器件的设计和分析理论上是基于阶跃折射率的自镜像效应,然而在离子交换过程中,由于参与交换的离子的热扩散特性,产生的是渐变折射率的波导。另外,在离子交换过程中深度对于窗口宽度的

依赖关系会影响输入输出波导和多模干涉区的模式耦合^[6],影响器件性能。

本文采用一次在硝酸融盐中进行热交换,二次进行无源的电场辅助交换方法制作了形状和折射率具有很强的重复性的多模波导。并在此基础上设计制作了 1×2 的多模功分器,对于 Y 分叉和 MMI 两种结构进行了比较。二者均能较好地实现光均分功能,验证了实验工艺参数的可行性。

2 多模波导制作

离子交换玻璃波导采用国产的牌号为 K9 的光学玻璃,器件制作工艺基本遵循清洗,蒸铝,匀胶,光刻,铝腐蚀,一次交换,去铝膜,电场辅助下二次交换,切片抛光,测试的步骤。

两次交换的过程如图 1 所示。一次交换在 $\text{AgNO}_3, \text{NaNO}_3$ 的混合溶液中进行,二次交换采用无源的电压辅助交换,即把经过一次交换的波导去掉掩膜,置于 $\text{NaNO}_3, \text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 的混合溶液中。两部分相互绝缘的溶液作为电极,使进入玻璃的银离子在电场驱动下向玻璃深处移动,在靠近玻璃的表面形成折射率较低的区域,实现波导的掩埋。

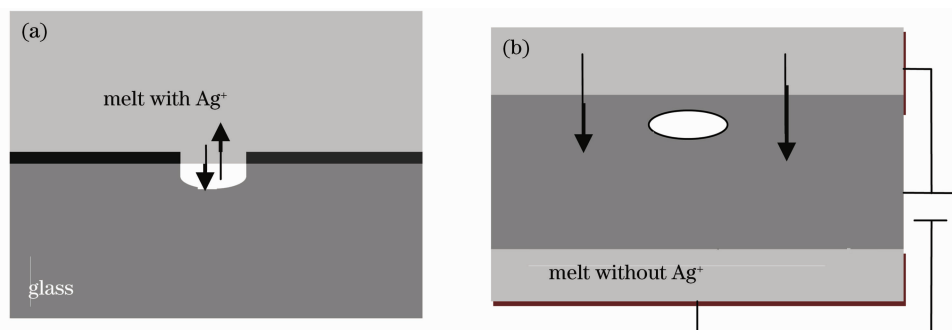


图 1 (a)离子交换示意图;(b)电场辅助交换示意图

Fig. 1 Schematic diagram of (a) $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$ ion exchange (b) Field-assisted burial of the waveguide

一次交换中,根据热扩散理论,离子的浓度、扩散温度和扩散时间都会影响到进入玻璃的银离子含量。若增加银离子浓度并且降低温度,会加重银线的形成。图 2 表示了窗口为 $50 \mu\text{m}$ 的条波导在一次交换后显微镜下的银线情况,发光线条即为银的沉淀。银线的形成与铝膜质量有关,若经过光刻后的铝膜边缘不光滑或者厚度不均匀,就会加大银被还原的可能。若只提高交换温度,又容易引起波导的弯曲和断裂。

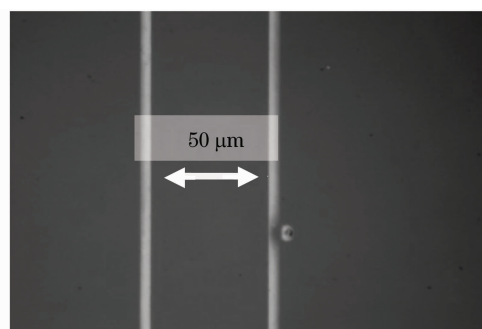


图 2 显微镜下宽度为 $50 \mu\text{m}$ 条波导银线图

Fig. 2 Silver precipitation along a $50 \mu\text{m}$ waveguide under microscope

二次交换过程中首先进行高温恒压(350 V),当电流升高到 40~65 mA 时再进行恒流过程,玻璃基片两端的电压最终会自然下降至 140 V。此恒流过程的持续时间和基片所处的环境温度可控制波导的深度和形状。

经过仔细的参数选择,最终一次交换在 350 °C 下进行,持续 2 h。二次交换在 340 °C 下进行,恒流为 60 mA,经过 3 h,最终制得了宽度和深度可控的

多模波导,而且工艺参数具有很强的重复性。图 3 为经过抛光后的显微镜下观察到的波导截面形状,光刻窗口的宽度依次为 20,100 和 200 μm 。在器件制作中,实际上,由于在玻璃中银离子的移动性比钠离子低,小尺寸波导的内部端面趋向于圆形^[7],可以大大减小与光纤的耦合损耗。尺寸较大的波导基本成平板型,边缘由于离子扩散呈现半圆

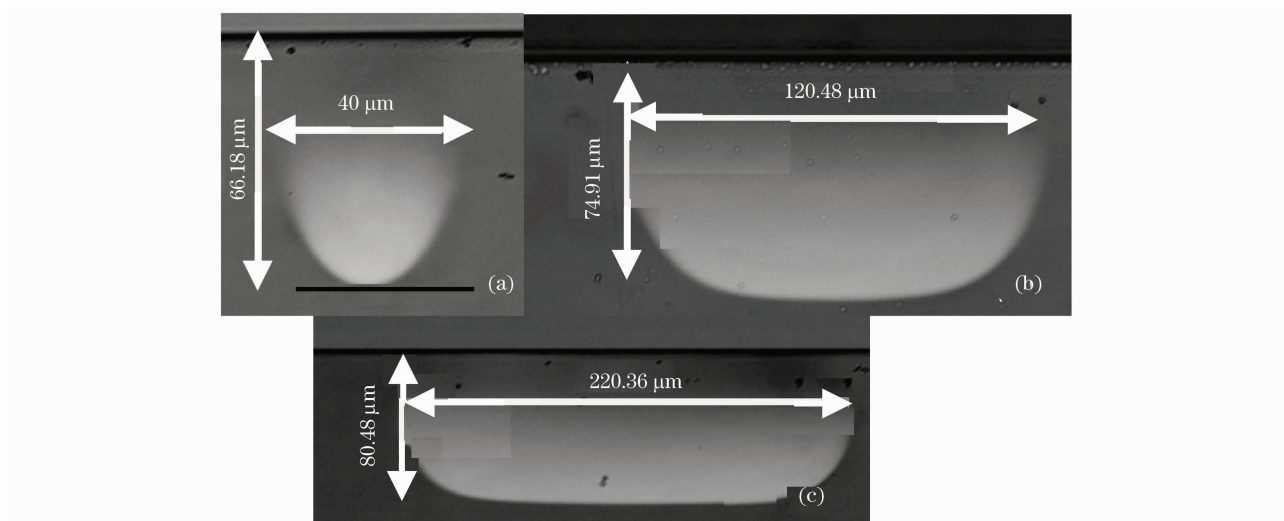


图 3 不同光刻窗口下的多模直波导截面图(a)20 μm ; (b)100 μm ; (c)200 μm

Fig. 3 Cross section of the multimode waveguides when the open mask is (a)20 μm ; (b)100 μm ; (c)200 μm

波导宽度,深度和窗口宽度的关系如图 4 所示。波导深度随着波导的宽度增加而略有增加,50~200 μm 的窗口基本使波导深度稳定在 72~80 μm ,波导展宽基本在 19~22 μm 之间波动。可见这种方法制作出的多模波导的展宽量和窗口宽

度无关,深度随窗口宽度略有上升,但相对于多模波导的尺寸来说浮动不大。在 MMI 结构中,由于多模干涉区的宽度和输入输出波导的宽度差别很大,这就为制作高性能的器件提供了可能。

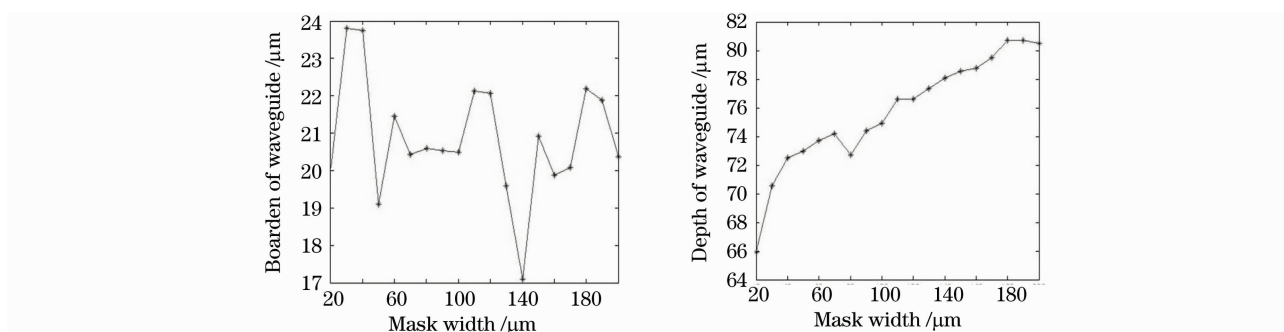


图 4 (a)波导展宽与光刻窗口关系图 (b)波导深度和光刻窗口关系图

Fig. 4 (a) Measured lateral broadening with mask width; (b) measured depth of straight waveguides with mask width

3 功分器设计

3.1 MMI 结构 1×2 功分器

对于多模干涉的模拟有很多方法,比如基于三维波束传输法的多模干涉耦合器成像位置的数值计

算^[8]。本文采用 Rsoft 软件,利用 3D-BPM 的方法对器件的性能进行模拟仿真,得到多模波导长度、输入波导和输出波导位置。为了保证输出波导之间不产生耦合,二者要有足够的间距。经过仿真对于宽度直径为 50 μm 的直波导,在中心间距大于 60 μm

时二者不会发生耦合。

根据自映像理论,输入场对称时,1×2 成像点的 MMI 区长度^[4]为

$$L_{\text{MMI}} = \frac{3L_{\pi}}{8}, \quad (1)$$

$$L_{\pi} = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} \approx \frac{4n_r W_e^2}{3\lambda_0}, \quad (2)$$

式中 β_0, β_1 分别为基模和一阶模的传播常量, L_{π} 为最低的二阶模的拍长, W_e 为 0 阶模的有效宽度, n_r 为波导的折射率, λ_0 为入射光的波长。可见 MMI 区的长度和宽度基本成二次的正相关性,且和波导折射率有关。

对波长为 1550 nm 的光源,设计的 MMI 1×2 多模功分器的参数如下:折射率选用阶跃状,衬底折射率为 1.517,折射率差 $\Delta n=0.0019$,工作波长 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$,输入输出波导宽度 $50 \mu\text{m}$ 。MMI 区采用抛物线型的锥体(taper)结构,初始宽度为 $200 \mu\text{m}$,输出端变为 $245 \mu\text{m}$,可以有效的减少多模干涉区的长度。多模区的形状不限于抛物线型,倒锥形的干涉区也可以改进器件的偏振相关性及容差性^[9]。图 5 显示了器件的光场模拟图。设计图实际边缘都是圆滑曲线或直线。可见功率完全均分,且损耗较小,分支损耗最优可以达到 3.23 dB。

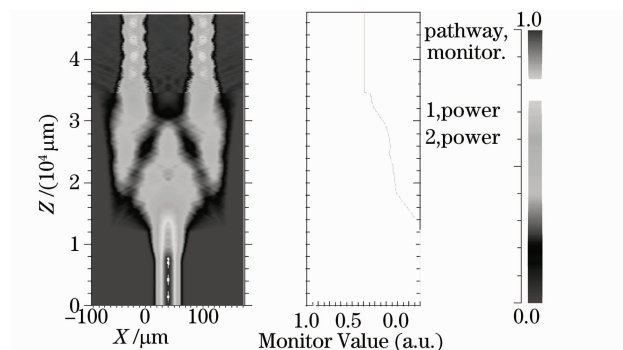


图 5 MMI 功分器模拟情况示意图

Fig. 5 Simulation of MMI power splitter

3.2 Y 分叉结构

在此 1×2 的结构中采用了双 Taper 的展宽结构进行对接,在线性、抛物线型和指数型的结构中,线性双 Taper 结构对器件结构与特性的改善效果最明显。在双 Taper 结构中,入射光进入双 Taper 模混合区后先经过衍射展宽,然后在侧壁来回反射,横向的模场强度会逐渐趋于均匀,经过另一个 Taper 后,光功率会更加平均地分配到输出分支中^[10]。这种结构,可以有效避免由于输入光场不对称而产生的功率不均分。图 6 为 Y 分叉的模拟图。Taper 区域总长 7 mm。分支损耗最优可达到 3.27 dB。

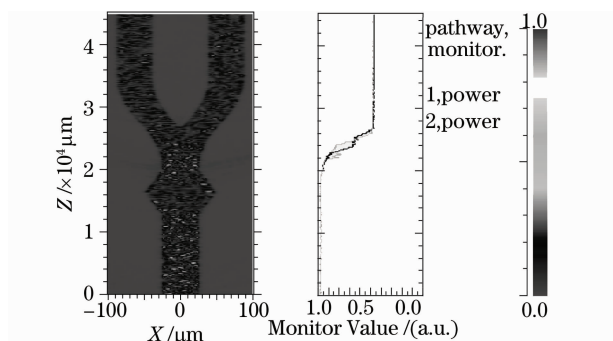


图 6 Y 分叉功分器模拟情况示意图

Fig. 6 Simulation of Y-junction power splitter

4 结果和分析

采用两步离子交换制作器件后,利用通光系统检测通光情况,并采用 1550 nm 激光光源进行损耗测试。波导输出的近场光斑图如图 7 所示。条波导和两种类型的功分器都能在端面观察到形状较好的多模光斑。

光斑可见略微的不均匀,除了离子交换本身引入的渐变折射率之外,输入光场的不完全对称和端面抛光问题都可能导致这一结果。

经损耗测试,50 μm 窗口的条波导传输损耗可以达到小于 0.28 dB/cm,MMI 功分器的插入损耗小于 4.3 dB。Y 分叉型功分器插入损耗小于 3.6 dB,两种功分器的均匀性优于 0.21 dB。

在 1×2 的器件中,MMI 结构相对于 Y 分叉的结构还没有体现出它的优越性。实验中造成 Y 分叉性能优于 MMI 的原因有:1)MMI 器件的多模干涉区长度对于宽度有依赖,由于波导展宽引入了成像点的移动,使得出口的位置不再位于最佳接收点;2)波导的折射率可能和仿真的设定值有出入,直接影响拍长并影响成像点;3)离子交换产生 MMI 干涉区域是渐变折射率型的,使得输出的像点在横向上有移动。

另外,由于实际的波导宽度已经超过了多模光纤能接受的范围,波导与光纤的耦合损耗比较大,因此实际测出的损耗偏大,故在版图的进一步设计上需要适当减小器件的尺寸。

即使在 1×2 的多模功分器件中,MMI 的优势还没有完全展现,需要根据波导的折射率分布和外部形状对器件结构进行容差性更大的设计,但是不影响 MMI 结构用于多模功分器的可行性。特别是对于 $N \times M$ 的多模器件,MMI 结构能够最简易地实现此功能。

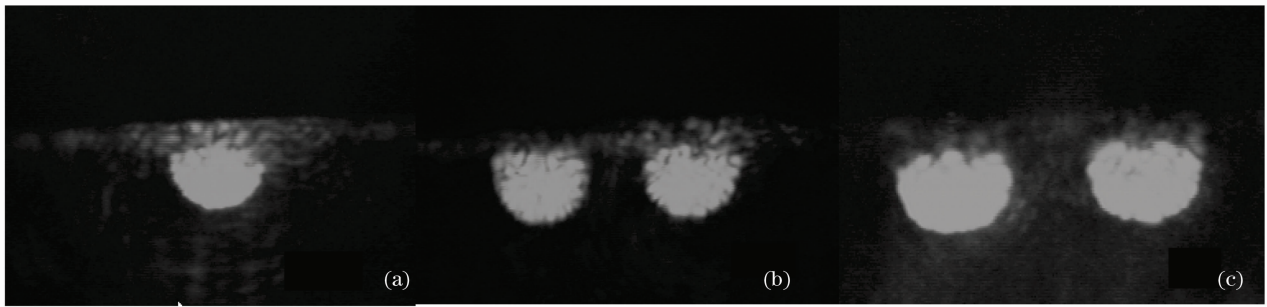


图 7 透光测试的近场光斑图(a)条波导; (b)MMI; (c)Y分叉

Fig. 7 Near field of the two outputs of the MMI splitter. (a) straight waveguide, (b) MMI, (c) Y-junction

5 结 论

本文利用二次的离子交换,成功地在玻璃基片上制作了深度和宽度可控的多模直波导。在此基础上,研制了 1×2 的多模干涉型和Y分叉型的功分器,且测试表明器件基本实现了光均分功能。

为了改善器件的性能,需要进一步研究器件制作的工艺参数,使其具有更强的重复性。同时,根据实验研究的结果,进一步完善器件设计,提高与光纤的耦合特性,降低插入损耗,研制出更好的交换型集成光学器件。

参 考 文 献

- Zhang Xiaoguang. Development and progress of mitigation and compensation for fiber polarization mode[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 525~539
张晓光. 光纤偏振模色散的缓解与补偿技术研究进展[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 525~539
- Zhang Yi. The selection of multiMode fiber and single mode fiber in design of integrated distribution system [J]. *Shanxi Architecture*, 2008, **4**(2): 203
张 毅. 综合布线设计中多模光纤和单模光纤的选择[J]. *山西建筑*, 2008, **4**(2): 203
- Zhang Yan, Zhang Jianzhong, Liu Zhihai *et al.*. Multimode fiber based temperature sensor with the capability of wavelength encoding[J]. *Acta Optics Sinica*, 2009, **29**(2): 327~330
张 滢, 张建中, 刘志海 等. 具有波长标定功能的多模光纤温度传感器[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 327~330
- L. B. Soldano, E. C. M. Pennings. Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications. [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, **13**(4): 615~627
- S. Musa, N. S. Lagali, G. J. M. Krijnen. Low-cost multimode waveguide couplers for multimode fiber-based local area networks [C]. *IEEE Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting*, 2000, 2: 468~469
- Mohamed A. Swillam, D. Khalil, A. Morshed. Effect of the fabrication and design parameters on the performance of multimode interference devices made by ion exchange: a detailed study[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2008, **10**: 125301
- B. G. pantchev. One-step field assisted ion exchange for fabrication of buried multimode optical strip waveguides. [J]. *Electronics Letters*, 1987, **23**(22): 1188~1190
- Yan Chaojun. Numerical calculation of imaging positions in multimode interference couplers by the three-dimensional beam propagation method [J]. *Acta Optics Sinica*, 2008, **28**(1): 110~114
严朝军. 采用三维波束传输法的多模干涉耦合成像位置的数值计算[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 110~114
- Zhao Feng, Zhou Jun, Zheng Huiru. Design and simulation of a new multimode interference power Splitter [J]. *Optics & Optoelectronic technology*, 2006, **4**(5): 39~42
赵 峰, 周 骏, 郑慧茹 等. 一种新型多模干涉分束器的设计模拟[J]. *光学与光电技术*, 2006, **4**(5): 39~42
- Sheng Ya. Study of glass-based ion-exchange multimode integrated optical splitter[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. 40~45
盛 亚. 离子交换玻璃基多模波导光功分器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006, 40~45