

# 一种新型的光纤锥形耦合器\*

金晓峰 徐森禄 杨国光

(浙江大学现代光学国家重点实验室, 杭州 310027)

林成鲁

萧天鹏

(中国科学院上海冶金研究所, 上海 200050) (上海电缆传输研究所, 上海 200437)

**摘 要** 提出了一种光纤波导折射率渐变的新型锥形(Taper)耦合器件, 其原理是基于光纤中 Ge 缺陷在紫外光照射下而产生的光致折射率的变化。利用光纤在高压、低温下渗氢技术使单模光纤的光致折射率变化  $\Delta n$  达  $6 \times 10^{-3}$  数量级; 通过控制曝光条件就可以在光纤中产生一定规律的锥形结构, 使单模光纤的模场半径由  $4.8 \mu\text{m}$  缩小到  $3.2 \mu\text{m}$ 。由耦合波理论分析表明该器件具有较好的基模传输特性。

**关键词** 光致折射率, 锥形耦合器, 模场半径, 耦合波理论。

各种光学传输元件由于其波导结构的不同, 存在不同的本征模场。在连接这些不同结构的波导时, 由于其模场的不匹配将影响光传输的效率, 以至整个光学系统的性能。因此这方面的研究一直是一个比较活跃的领域。激光器与光纤的连接, 通常可以采用加折射率渐变的自聚焦透镜或光纤熔锥形耦合的方法<sup>[1, 2]</sup>。自聚焦透镜是一种分立元件, 一般用于大模斑激光器与小模场光纤波导的耦合, 然其在设计、加工和使用过程中尚有不方便之处。光纤熔锥形耦合器是使光纤波导尺寸拉制成锥形过渡结构以增加小模斑半导体激光器与大模场光纤波导的匹配。对于应用于各种集成光学的波导结构与光纤的耦合, 也可以采用类似的波导尺寸渐变过渡结构, 以提高耦合效率。然对于两种不同模场直径的光纤波导的耦合问题, 一直未能有效地解决。根据 Marcuse 的分析结果<sup>[3]</sup>, 当不考虑光纤熔接时位置精度带来的损耗, 当两光纤模场尺寸比例  $w_1/w_2 = 1.4$  (或 0.71) 时将产生 10% 的功率传输损耗。这是在实际工作中经常遇到的问题。在光纤传感器中, 由于使用不同类型的光纤还会影响传感系统的精度。例如, 在去偏干涉型光纤陀螺中由不同芯径单模光纤与保偏光纤连接时模场失配产生的背向散射光与激起的高阶模将影响陀螺的零点漂移。

本文提出了一种新型的光纤折射率渐变的耦合器件, 特别适用于解决两种不同模场尺寸的光纤耦合问题。利用光纤中 Ge 缺陷在紫外光照射下产生光致折射率效应, 使芯径与包层折射率差增加<sup>[4, 5]</sup>, 通过改变曝光条件就可以在沿光纤传输轴方向形成一定规律的折射率锥形器件。类似于光纤熔锥形耦合器, 但这里不是波导尺寸的逐渐改变, 而是一种波导折射率

\* 国家自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1995年6月9日

的渐变结构。从某种意义上来说,它是一种折射率渐变器件。与一般折射率渐变器件不同的是,它是一种全光纤的结构。

## 1 光纤中光致折射率效应

1978年, Hill等人首先发现光纤中光致折射率效应<sup>[4]</sup>。光纤中光致折射率效应通常用来制作布拉格光栅器件<sup>[6, 7]</sup>。作者提出利用光致折射率效应来产生光纤波导折射率渐变的锥形器件。直到现在人们对光纤中光致折射率效应的机理尚未能清楚地解释。光致折射率效应在光子能量为 5.1 eV(240 nm 波长)附近较为有效。因此人们推断这种现象是由于掺 Ge 光纤中吸收带位于 241.6 nm 的 Ge[ I ]缺陷引起的。Ge[ I ]缺陷的吸收带在紫外光照射下的光致变色以及增加光纤中掺 Ge 的浓度会提高光致折射率效率等现象都支持了这一效应与 Ge[ I ]缺陷有关的断定。一种提出的机制认为,在紫外光的作用下,240 nm 的吸收带部分地变色,同时在紫外光的作用下会产生新的缺陷如 Ge[ I ], Ge[ II ]缺陷。这些缺陷在吸收光子后会激发运动的电子和产生 GeE' 色心,且会进一步变色吸收带。Kramers-Kronig 模型把 180 nm~300 nm 波长范围吸收带的变化与折射率变化联系起来。这种学说有利于解释小的光致折射率变化  $\Delta n < 10^{-4}$ 。对于大的折射率变化  $\Delta n > 10^{-3}$  有人提出,此时不仅仅与电子的重新分布有关,在高强激光作用下会在芯径与包层的界面产生损伤的现象,这一事实显示了石英玻璃内产生了由结构重新组合的致密性的变化。这种学说认为折射率的变化是由于紫外光的吸收会产生某些键的断裂,导致 SiO<sub>2</sub> 的结构发生改变,比如一个高阶环结构崩裂为 2~3 个低阶环,这时产生能带边缘的移动,而不仅仅是由于位于中间带隙的缺陷的重新分布。

最近又有人发现光纤在低温高压下的 H<sub>2</sub> 气处理后可以大大提高光致折射率的灵敏度<sup>[8]</sup>,产生大的折射率变化。现在也还不知道到底是什么引起能带边缘的移动,提出的机制认为 H<sub>2</sub> 分子与标准的 Si-O-Ge 缺陷在紫外光照射下产生反应,生成 Si-OH 与缺氧的 Ge 缺陷,这两者都导致了折射率的变化。为了与 Ge 缺陷 242 nm 吸收带对应,通常采用 242 nm 或 248 nm 的 KrF 激光。最近 Hill 等人利用 193 nm ArF 准分子激光研究光致折射率效应的结果表明,利用 193 nm 激光比 242 nm 或 248 nm 在同样条件下产生的光致折射率变化更为有效<sup>[9]</sup>。这一发现对前面所提的 242 nm 吸收带等假说又提出了有力的挑战。

## 2 光纤折射率锥形耦合器的研制

本文也进行了光纤中光致折射率效应的研究。利用金属氧化物化学气相淀积法(MOCVD)生长的标准单模光纤进行高压低温下渗氢处理。在 H<sub>2</sub> 压力大于  $1.267 \times 10^4$  kPa 的容器内放置光纤,并在常温 20°C 的环境下保持 12 day。根据 H<sub>2</sub> 分子在石英玻璃的溶解速度,12 day 的时间对 125 μm 的单模光纤的芯径内已达到 95% 的 H<sub>2</sub> 饱和溶解度。其溶解的 H<sub>2</sub> 为 1.7 mol%。虽然适当提高温度可以加快 H<sub>2</sub> 的溶解速度,但温度的提高将降低 H<sub>2</sub> 的饱和溶解度。

标准单模通信光纤 Ge 的掺杂浓度为 3 mol%。Lambda Physics ArF 193 nm 准分子激光其脉冲宽度为  $\Delta\tau = 17$  ns,重复频率为 10 Hz,输出脉冲能量为 120 mJ,经光学系统会聚后光能量密度达 2.5 J/cm<sup>2</sup>;曝光时间为 30 min。利用近场图法测试曝光光纤(10 mm 长)与标准单模光纤的折射率轮廓曲线比较如图 1 所示。所达到的光致折射率变化  $\Delta n$  达  $6 \times 10^{-3}$ 。折射率的变化与曝光时间的实验曲线如图 2 所示。一定量的光致折射率变化可以由控制光纤的曝光时

间来获得。在本实验的条件下得到的光致折射率变化是稳定的，在 150°C 下保持 20 天并无发现折射率退化的现象。制作光纤折射率锥形器件的方法如图 3 所示。调节光学系统使沿光纤长度方向 193 nm 激光的光斑尺寸为 3~5 mm，在光纤横向为 0.5 mm。光纤经渗 H<sub>2</sub> 处理后固定在滑动部件上，控制滑动部件的移动速度来控制对应的曝光量。在光纤轴上某一点的曝光量可以由该点自进入曝光区域到离开曝光区域的时间积分来计算。这个移动装置可以由单片机控制步进马达运动来实现。这样就可以得到任意形状过渡的锥形器件。制作的锥形器件耦合区长度为 30 mm。

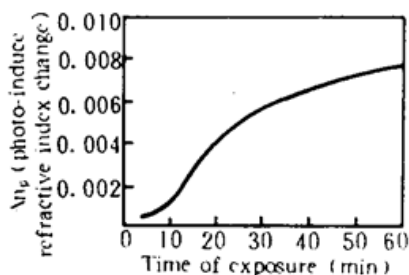


Fig. 2 Change in normalized index difference as a function of time of exposure

光纤中基模的场分布可以用高斯场来近似，在  $1.2 \leq V \leq 3$  的范围，精度优于 1%，其中  $V$  为光纤波导的归一化常数：

$$V = k_0 a (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \approx k_0 a (2n_2 \Delta n)^{1/2} \approx k_0 a n_2 (2\Delta n)^{1/2} \quad (1)$$

式中  $k_0$  为真空波矢， $2a$  为光纤芯径尺寸， $n_2$  为包层折射率， $n_1$  为芯径折射率， $\Delta n$  为折射率差。归一化模场半径可以由下式来近似<sup>[10]</sup>：

$$w_0/a = 0.65 + 1.619V^{-3/2} + 2.879V^{-6} \quad (2)$$

在光纤折射率锥形器件中其随轴向渐变的折射率差就会产生模场半径的缓慢改变。当折射率变化为  $6 \times 10^{-3}$  时，模场半径由原来的  $4.8 \mu\text{m}$  缩小到  $3.2 \mu\text{m}$ 。

### 4 光纤折射率锥形器件的耦合波理论分析

在折射率锥形器件的高折射率差的一端，其归一化传播常数  $V > 2.405$ ，意味着波导容许 LP<sub>11</sub> 等高阶模的存在。为了更好地了解器件的传输与模式转化特性，利用耦合波理论进行分析。为了一般起见，以抛物线折射率分布光纤为例，并设耦合区起始端  $Z = 0$ ， $a(0) = 0$ 。

$$n(r, z) = \begin{cases} n_1(r, z) = n_1 \Delta [1 + a(z)] [1 - (r/a)^g] + n_2 & 0 \leq r \leq a \\ n_2 = n_1(1 - \Delta) & a \leq r \leq b \\ n_3 = 1 & r > b \end{cases} \quad (3)$$

以上假设的物理意义为：光致折射率与芯径和包层折射率差成比例，近似地认为与掺 Ge 的浓度即与 Ge 缺陷的含量成一定的线性关系。对于阶梯折射率分布光纤  $g \rightarrow \infty$ ，对平方律折射率分布  $g = 2$  用标量场近似，横向场分量满足波动方程：

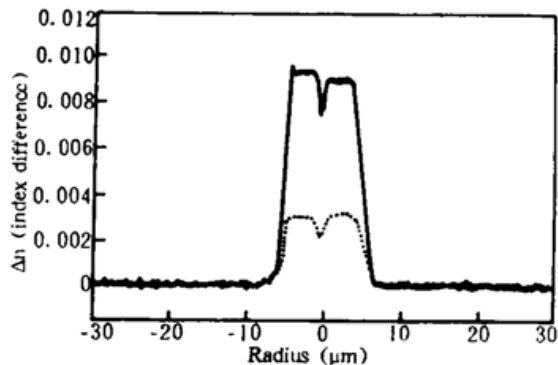


Fig. 1 Refractive-index profiles for single-mode communications fiber, dashed line: original profile, solid line: after 30 min of exposure

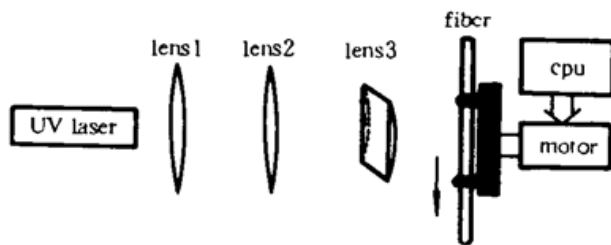


Fig. 3 Experiment setup

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + n^2(r, z)k^2 \psi = 0 \quad (4)$$

在光纤折射率过渡区,任意点的场可以用本地模  $\phi_m$  的迭加表示:

$$\psi = \sum_{m=-\infty}^{\infty} C_m(z) \phi_m \exp \left[ -j \int_0^z \beta_m(z') dz' \right] \quad (5)$$

各个本地模满足波动方程为:

$$\frac{\partial^2 \phi_m}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi_m}{\partial r} + [n^2(r, z)k^2 - \beta_m^2] \phi_m = 0 \quad (6)$$

在锥形耦合区,所有的模式彼此耦合。因而展开系数  $C_m$  彼此联系,满足耦合波方程:

$$\frac{dC_m}{dz} = \sum_n R_{mn} C_n \exp \left[ j \int_0^z (\beta_m - \beta_n) dz' \right] \quad (7)$$

耦合系数:

$$R_{mn} = \frac{\pi k}{n_1(\beta_m - \beta_n)} \int_0^{\infty} \frac{\partial n^2(r, z)}{\partial z} r \phi_m \phi_n dr \quad (8)$$

(7)式计及由于折射率不均匀而引起的入射模式的背向散射,此时  $\beta_m = -\beta_n$ 。由于耦合只在芯区起作用,包层不产生折射率的变化,所以(8)式的积分区域变为  $0 \leq r \leq a$ ,为了简单起见,只考虑基模  $LP_{01}$  模的反向散射耦合和  $LP_{01}$  与四个最低的模式的情况,而与其他高阶模的耦合要小得多。利用数值分析计算(8)式的耦合系数,代入(7)式求解模式耦合情况。图4的实线为阶梯光纤在折射率线性锥形过渡区长度为30mm的  $LP_{01}$  反向耦合随传输距离  $z$  的变化曲线,虚线为  $LP_{11}$  模耦合曲线,图5为  $LP_{01}$  模传输特性曲线;其他高阶模的耦合要比  $LP_{11}$  模小50倍以上。由图中可以看出  $LP_{01}$  模的反向散射小于-50dB,  $LP_{11}$  模的耦合幅度小于-20dB,  $LP_{01}$  模能得到较好的传输,传输损耗小于-0.04dB。

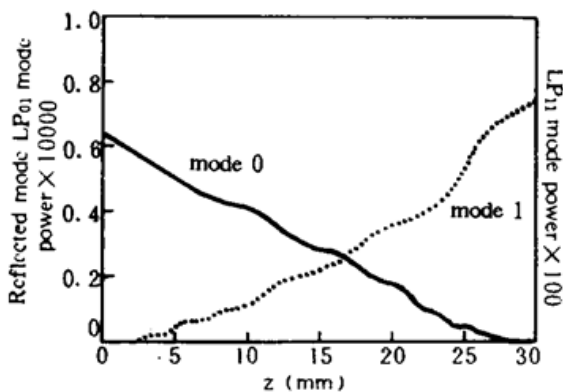


Fig. 4 Power in reflected mode 0 and in mode 1 as a function of  $z$  for linear taper

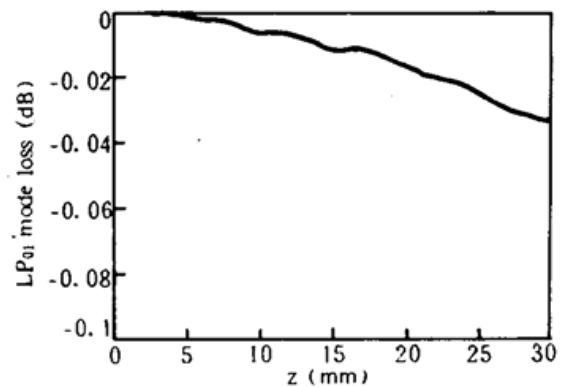


Fig. 5 Power in transmissive mode 0 as a function of  $z$  for linear taper

**结 论** 本文提出了一种新型的光纤折射率锥形器件。利用 ArF 193 nm 强激光照射下使一般单模光纤内部的折射率产生较大的变化;高压低温的渗  $H_2$  处理又进一步提高光致折射率灵敏度;采用控制技术使光纤的轴向形成一定的折射率渐变过渡的耦合器件。模式分析的结果表明该器件具有较好的基模传输特性与较小的向其他模式转变的可能性。这种器件可以有效地解决不同模场直径的光纤的熔接问题,也可用于半导体激光器与光纤的耦合。并且作者相信在常规的熔锥形光纤器件基础上制作一定的折射率锥形,可以进一步提高半导体激光器或集成光波导与光纤的耦合效率。

## 参 考 文 献

- [1] J. Amitay, H. M. presby, F. V. Dimarcello *et al.*, Optical fiber tapers — a novel approach to self-aligned beam expansion and single-mode hardware. *J. Lightwave Technology*, 1987, **5**(1): 70~76
- [2] K. P. Jedrzejewski, F. martinez, J. F. Minelly *et al.*, Tapered beam expander for single-mode optical fiber GAP devices. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(2): 105~106
- [3] D. Marcuse, Loss analysis of single-mode fiber splices. *Bell Sys. Tech. J.*, 1977, **56**(5): 703~718
- [4] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson *et al.*, Photosensitivity in optical fiber waveguides; application to reflection filter fabrication. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **32**(10): 647
- [5] D. P. Hand, P. St. J. Russell, Photo-induced refractive index changes in germanosilicate fibers. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(2): 102~104
- [6] J-L. Archanbanlt, L. Reeckie, P. St. J. Russell, 100% reflectivity Bragg reflectors produced in optical fibers by single excimer laser pulses. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(5): 453~455
- [7] V. Mizrahi, P. J. Lemaire, T. Erdogan *et al.*, Ultraviolet laser fabrication of ultrastrong optical fiber gratings and of Germania-doped channel waveguides. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(13): 1727~1729
- [8] P. J. Lemaire, R. M. Atikins, V. Mizrahi *et al.*, High pressure H<sub>2</sub> loading as a technique for achieving UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO<sub>2</sub> doped optical fibers. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(13): 1191~1193
- [9] J. Albert, B. Malo, F. Bilodeau *et al.*, Photosensitivity in Ge-doped silica optical waveguides and fibers with 193 nm light from an ArF excimer laser. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(6): 387~389
- [10] LUC B. Jeunhomme, *Single-Mode Fiber Optics, Principles and Applications*, Marcel Dekker, Inc, New York, USA, 1983: 16~18

## A Novel Tapered Fiber Optical Coupler

Jin Xiaofeng      Xu Senlu      Yang Guoguang

(The State Key Laboratory of Modern Optical Instruments of Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Lin Chenglu

(Shanghai Institute of Metallurgy, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050)

Xiao Tianpeng

(Shanghai Insitute of Cable &amp; Telecom, Shanghai 200437)

(Received 1995; revised 1995)

**Abstract** A novel fiber optical tapered coupler is proposed with its waveguide refractive index gradually changing, induced by germania defects under the UV irradiation. The refractive index change  $\Delta n$  of  $6 \times 10^{-3}$  in the single-mode communications fiber is achieved in our experiment by means of pre-treating the fiber in high-pressure and low-temperature environment. A particular index taper profile function is obtained by delicately controlling the exposure conditions, and the mode field radius (MFR) is reduced from 4.8  $\mu\text{m}$  to 3.2  $\mu\text{m}$  in single-mode fibers. The coupled wave theory analysis show that the tapered coupler is capable of excellent transmission for fundamental mode with very small mode conversions.

**Key words** photo-induced refraction, tapered coupler, mode field radius, coupled wave theory