

文章编号 1004-924X(2006)03-0368-04

CO₂ 激光熔拉锥过程光功率控制研究

刘丽飒^{1, 2}, 张磊¹, 蔡志平³

(1. 厦门大学 物理系, 福建 厦门 361005; 2. 南开大学 物理学院, 天津 300071;

3. 厦门大学 电子工程系, 福建 厦门 361005)

摘要: 基于 CO₂ 熔拉锥技术, 对熔拉锥设备的控制方法进行了改进。利用柱体 Mie 散射公式计算光纤在加工过程中的光能利用率, 结合 Grellier 的热传导模型, 确定了加工过程中激光功率增长与光纤拉伸距离之间的对应关系。利用计算结果, 采用分段直线递增的方法对激光功率进行控制, 简化了仪器控制的难度。实验得到锥腰直径 2~3 μm 左右的熔锥光纤, 锥腰和过渡区的形状和尺寸都得到了很好的控制。

关键词: 激光加工; 熔锥光纤; Mie 散射; 激光能量; 热平衡

中图分类号: TN249 文献标识码: A

CO₂ laser fabrication of biconical-tapered fiber and its laser power controlling

LIU Lisha^{1, 2}, ZHANG Lei¹, CAI Zhiping³

(1. Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. College of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China; 3. Department of Electronic Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Based on CO₂ laser fabrication of fused-fiber taper rig developed by E. D. Timothy in 1999, a shorter focused lens was used to improve the laser power controlling in the paper. The Mie theory of cylindrical structures and the heat transfer modeling proposed by A. J. C. Grellier was used to derive the increment relation of the laser power with the draw bench distance. The relation was in section increase linearly by degrees for laser power controlling, which simplifies the computer control of the rig. The fused biconical-tapered fibers with 2~3 μm diameter in the waist were obtained in the experiment, it indicates the size and shape of biconical-tapered fiber is consistent with the predicted one well.

Key words: laser processing; fiber taper; Mie scattering; laser energy; heat balance

1 引言

CO₂ 激光加工工艺已经成功地应用在许多

基于光纤加工的集成光学器件的制备过程。例如: 制作长周期光纤光栅^[1]、近场扫描探针^[2]和用于 LD 耦合非球面光纤透镜^[3]等。熔锥光纤是具有锥腰和对称双锥过渡区的特殊波导结构, 主要

收稿日期: 2005-04-22; 修订日期: 2006-04-18.

应用在对声光转换器^[4]、光学放大器^[5]和微腔器件以及光子晶体的耦合输入输出中^[6,7]。CO₂ 熔拉锥的方法与装置是由英国巴斯大学 Timothy 等人于 1999 年提出的新技术^[8]。利用 CO₂ 激光熔拉锥得到的锥腰直径波动范围在 1.2% 以内, 且由于 CO₂ 激光对光纤进行加热会有自约束效应(self-regulating)^[9], 光纤被拉细到一定的半径后如果不加大激光器功率就不能再变细, 所以, 该技术对精确控制熔锥光纤的加工锥腰半径十分有利, 有望对目前火焰法工艺条件下, 器件易产生耦合区析晶、锥区微裂纹等流变缺陷加以改善^[10]。CO₂ 激光熔拉锥加工过程中光功率控制要求的分析, 将对上述集成光学器件的制备有很大的帮助。本文对 CO₂ 激光熔拉锥加工过程中光功率的控制要求进行研究, 通过对已有的 CO₂ 激光熔拉锥在结构和控制方法上进行改进, 降低系统操作和控制上的难度, 收到了良好的实验效果。

2 实验装置与控制方法

CO₂ 熔融拉锥法是将标准通讯光纤除去保护层的裸纤部分置于二氧化碳激光下加热熔融, 同时由步进电机带动固定光纤的夹具向两侧拉伸, 最终形成包含两个对称过渡区和锥腰的双锥体形状的特殊波导结构。图 1 给出了 CO₂ 激光作为热源的光纤熔拉锥系统的装置结构示意图和实验采用装置的实物照片。整个装置可分为四个组成部分: 热源供应、热区扩展、拉伸动力装置和监视装置。

SynradTM 48-2) 作为加热光纤的热源, 其连续输出功率在 0~ 25 W 的范围内连续可调, 调节精度为 0.5%。出射的 CO₂ 激光 98% 垂直线偏振, 功率稳定在设定值的以内。由于 CO₂ 激光不可见, 采用了波长 650 nm 高质量的 LD 代替文献[8]中的 He-Ne 激光器作为光路指示器。实验首先将 LD 光束与 CO₂ 激光精确对准, 这是装置中其他仪器的校准基础。使用 ZnSe 透镜对 CO₂ 激光聚焦, ZnSe 材料对 CO₂ 激光的吸收率小于 0.25%。为得到较高的功率密度, 选取了较文献[8]更短焦距的透镜, 经焦距 20 cm 透镜聚焦后的 CO₂ 激光光斑直径约为 224 μm。

热区扩展部分靠振镜式扫描系统来完成, 其作用是将激光点热源按需要控制成指定长度的线热源。振镜在频率 80 Hz 三角波形的外界电压信号控制下以匀角速度做往复运动, 使激光功率在扫描范围内均匀分布。扫描振镜的偏转角与控制电压成正比, 对应关系是 1 V/1 角度。

拉伸动力装置由步进电机驱动的两个线性平移台以及和其上固定一个五维调整架和固定裸纤的夹具组成。实验中步进机单步步长为 1.25 μm。光纤需要和扩展后的热源激光调整至完全重合。LD 光的发散角大于 HeNe 激光, 为了克服 LD 远场光斑大, 引起的光束对准方面的困难, 实验中首先将 CO₂ 激光光束与 LD 红光中心对准。与光纤对准时, 通过观察 LD 指示光经扫描头扩展为线光源以后, 绕过光纤时的衍射条纹分布来进行精确调整。当衍射条纹均匀对称地分布于光纤阴影两侧时, 光纤即与 CO₂ 激光精确重合。

监视装置由一台体式显微镜、CCD 摄像头、视频捕捉卡构成。由于标准通信光纤的裸纤直径为 125 μm, 最终拉伸成的熔锥光纤耦合器的锥腰

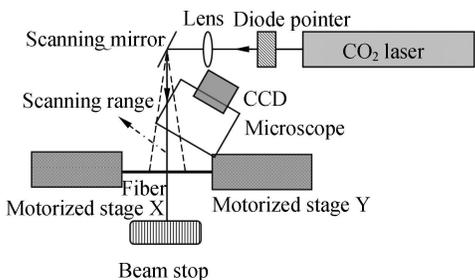


图 1 CO₂ 激光熔拉锥系统装置示意图

Fig. 1 Schematic of the CO₂ laser fabrication of bi-conical tapered fibers

热源供应部分由 CO₂ 激光器、指示器和聚焦透镜组成。装有稳定回路的 CO₂ 激光器(型号:

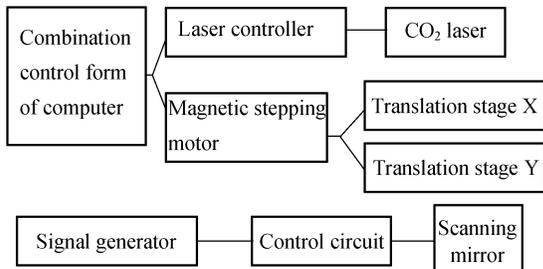


图 2 仪器的控制方式示意图

Fig. 2 Control method of the rig

部分仅为几微米, 所以必须在光学和电子放大的情况下才能大致了解加工过程是否顺利, 有无光纤断裂等情况发生。实验过程通过电脑显示器对由视频捕捉卡捕捉的视频进行观测与记录。

图 2 给出了实验中各主要仪器的控制方式示意图。待定的控制参数是激光器的功率与平移台的移动的联合控制关系。

3 加工过程中热平衡的建立

CO₂ 熔拉锥系统与火焰法拉锥系统最大的区别在于 CO₂ 激光的能量首先必须被光纤吸收转化为热能, 然后才通过热传导, 对流和辐射的形式达到热平衡状态。应用由圆柱边界的 Mie 散射理论可以推算出光纤对 CO₂ 激光的光能吸收率。考虑到实验所采用的激光热源是 98% 垂直线偏振, 根据 Mie 理论对于圆柱体结构物体与电磁场相互作用时光吸收系数为^[11]

$$Q_{\text{abs}} = Q_{\text{ext}} - Q_{\text{sca}}, \quad (1)$$

$$E \perp \text{axis} \begin{cases} Q_{\text{ext}} = \frac{2}{x} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \text{Re}(a_n) \\ Q_{\text{sca}} = \frac{2}{x} \sum_{i=-\infty}^{\infty} |a_n|^2, \end{cases} \quad (2)$$

其中:

$$a_n = \frac{J'_n(\gamma) J_n(x) - m_f J_n(\gamma) J'_n(x)}{J_n(\gamma) H_n(x) - m_f J_n(\gamma) H'_n(x)}. \quad (3)$$

这里 Q_{abs} 、 Q_{ext} 和 Q_{sca} 分别为光纤对电磁场的吸收系数、消光系数和散射系数。光纤的尺寸参数, 满足 $x = 2\pi a/\lambda$ a 为熔锥光纤锥腰半径。 $y = mx$, $m = n - ik$ 为光纤的复折射率。对于 10.6 μm 的 CO₂ 激光波长 $n = 2.18$, $k = 0.0182 + 10.1 \times 10^5 (T_s - 273.15)$, 其中 $T_s = 1700$ K 是光纤的

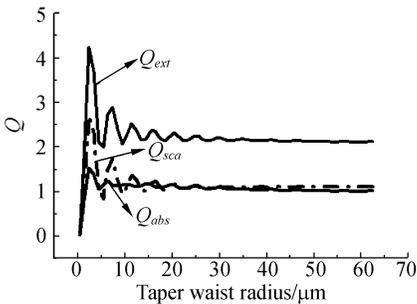


图 3 不同锥腰直径下的 Q_{abs} 、 Q_{ext} 和 Q_{sca}

Fig. 3 Variation of Q_{abs} 、 Q_{ext} and Q_{sca} with the taper waist radius

软化温度, λ 为 CO₂ 激光波长 10.6 μm。 J_n 和 H_n 分别表示 n 阶柱 Bessel 方程和第二类柱 Hankel 方程。不同锥腰直径下, 光纤对 CO₂ 激光的吸收系数、消光系数和散射系数计算结果图 3 所示。

由 $I_{\text{abs}} = I_i \exp(-\alpha_{\text{abs}} h)$ 其中 I_{abs} 为吸收的光强, I_i 为入射光强, h 为物质厚度, 这里 $h = 2a$ 。其中系数 $\alpha_{\text{abs}} = \frac{Q_{\text{abs}} A}{V}$, A 为物体垂直于入射平面的截面积, 这里 $A = 2aL$, L 为曝光的光纤长度。 V 为物体曝光体积, 这里 $V = \pi a^2 L$ 。因此光能的吸收率

$$\eta_{\text{abs}} = \frac{I_{\text{abs}}}{I_i} = \exp\left(-\frac{4Q_{\text{abs}}}{\pi}\right), \quad (4)$$

将光纤对 CO₂ 激光的吸收系数折算成吸收光能百分比后的结果如图 4, 说明随着光纤不断被拉伸变细, 光能的吸收率在不断下降。

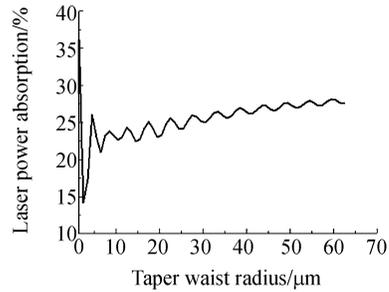


图 4 不同锥腰光功率吸收百分比

Fig. 4 Variation ratio of laser power absorption with the taper waist radius

考虑到光能的吸收、热传导、对流和辐射, 利用 Grellier 的热传导模型, 可以得到如下关系式:

$$q_x + E_g = q_c + E_s + q_{x+\delta x} + q_r, \quad (5)$$

其中 q_x 和 $q_{x+\delta x}$ 为单位时间沿光纤 x 和 $x + \delta x$ 相邻处的热传导能量, 满足

$$q_x = -[KA(\delta T/\delta x)]_x, \quad (6)$$

$$q_{x+\delta x} = -[KA(\delta T/\delta x)]_{x+\delta x},$$

K 为光纤的热导率, q_c 为单位时间光纤 δx 长度内的对流的能量, 满足

$$q_c = Hp(T - T_{\text{air}})\delta x, \quad (7)$$

其中 $H = 418.68 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, 为光纤的对流系数, p 为光纤的周长。 T 为光纤绝对温度, T_{air} 为周围环境的绝对温度。

E_s 为单位时间内光纤 δx 长度内存储的能量, 满足

$$E_s = \rho c A (\delta T / \delta t) \delta x, \quad (8)$$

其中 $\rho = 2\,200 \text{ kg m}^{-3}$ 为光纤密度, $c = -887.26 - 0.538(T - 1570) + 56\sqrt{T} \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 。

E_g 为为单位时间内光纤 δx 长度内吸收的光能, 满足

$$E_g = A q(x) \delta x, \quad (9)$$

其中 $q(x)$ 为单位体积内光纤吸收的激光能量。

q_r 为单位时间内光纤 δx 长度内辐射的能量。依据 Stefan 定律黑体的辐射功率与其温度的四次方成正比, 满足

$$q_r = \sigma \epsilon_p (T^4 - T_{air}^4) \delta x, \quad (10)$$

其中 $\sigma = 53.67 \times 10^8 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ 为 Boltzman 常数。 $\epsilon = \exp[-(T - 293)/500 + 1] + 0.06$ 为辐射率。因此式(5)可以表达为

$$\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} = \frac{2H}{aK} (T - T_{air}) + \frac{\rho c \delta T}{K \delta t} + \frac{2\sigma \epsilon}{aK} (T^4 - T_{air}^4) - \frac{q(x)}{K}, \quad (11)$$

当光纤处于热平衡时, 光纤的温度不随时间发生变化, 即 $\frac{\delta T}{\delta t} = 0$, 在光纤轴向上的温差梯度为零,

即 $\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} = 0$ 。当光纤达到熔化温度时则式(11)表达为:

$$2H (T_s - T_{air}) + 2\sigma \epsilon (T_s^4 - T_{air}^4) = q(x) a, \quad (12)$$

当给振镜供给振幅和频率不变的三角波电压使扫描头以匀角速度扫描时, 在频率足够快的情况下, 光强在沿光纤轴的 x 方向上曝光光纤长度 L_f 范围内可以视为是均匀分布的。而沿与光纤轴向垂直的 y 方向上, 则是按高斯分布的。所以由 $q(x)$

$$= \frac{\delta W_{abs}}{2aL \delta x}, \quad \delta W_{abs} = \eta_{abs} \delta x \int_{-a}^a I(y) dy \text{ 得}$$

$$q(x) = \frac{\eta_{abs} \int_{-a}^a I(y) dy}{2aL}, \quad (13)$$

$$I(y) = \frac{P}{\omega L_f} \exp\left[-\frac{2y^2}{\omega^2}\right]. \quad (14)$$

其中 P 为 CO₂ 激光器输出功率, I 为 CO₂ 激光光强。 $\omega = 112 \mu\text{m}$ 为 CO₂ 激光经聚焦透镜聚焦后的光斑半径。

式(12)~(14)可得到实验中当光纤被拉伸到不同锥腰半径时所需要的光功率。计算时由于 CO₂ 激光器水箱制冷所需的环境温度为 25℃, 取

$T_{air} = 298 \text{ K}$ 。 $L_f = 600 \mu\text{m}$ 为 CO₂ 激光经振镜扫描后扩展的线热源长度。计算时需用到积分关系:

$$erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt, \quad (15)$$

可以得到锥腰半径与需要光功率之间的对应关系, 如图 5 所示。由此可以看出随着光纤不断的拉伸, 锥腰直径不断变细, 要满足锥腰熔化所需的光功率应该不断加大。

当光功率严格按照要求控制和限于 CO₂ 激光完全重合的理想状态下, 所得到的熔锥形状^[12]

$$a = a_0 \exp\left(-\frac{z}{2L}\right), \quad (16)$$

z 为平移台单向拉伸距离, 裸纤半径 a_0 为 62.5 μm 。依据实验中步进机每 800 步/1 mm 的对应关系, 就可以得到运行步数与光功率之间的对应关系(见图 6 数据点), 方便计算机进行联合控制。图 5 和图 6 是针对具体的拉锥系统参数和特定振镜扫描范围进行的计算结果, 如果参数变更则应重新计算。

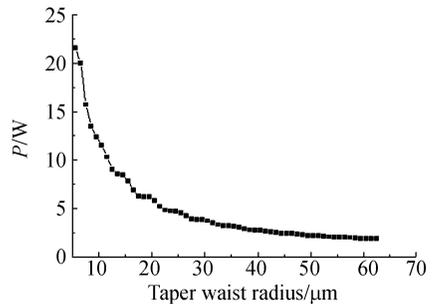


图 5 锥腰半径与需要光功率之间的对应关系

Fig. 5 Variation of laser power with taper waist radius

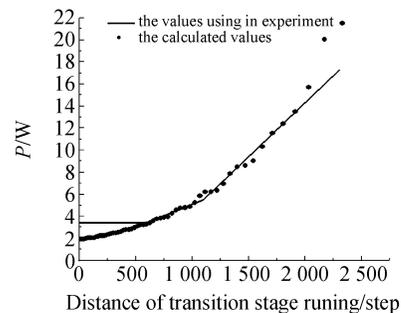


图 6 步进机运行距离与光功率之间的关系

Fig. 6 Variation of laser power with steps of transition stage runing

4 实验参数与结果

根据理论计算数据点的趋势, 采用了分段直线拟合的方法, 将控制关系简化成三段直线。这使得控制软件在实现控制数据传输上, 得到大大的简化, 在很大程度上降低了联合控制软件开发上的难度。

实验中每台步进机每次 2 步的方式交替运行。实际测算拉伸动力装置的运行速度为 $120 \mu\text{m}/\text{s}$, 以保证光纤耦合器的损耗较小, 即性能及其一致性较好^[10]。对于激光功率与步进机运行步数联合控制, 其功率增长如图 6, 为 0~600 步, 激光输出功率设定为最大输出值 25 W 的 13.5%。600~1100 步时, 功率的增长率为步进机每运行 50 步功率增长 0.5%。1100~2300 步时, 功率的增长率为步进机每运行 26 步功率增长 1%。每次功率只能以 0.5% 的间隔跳跃式增长是受限于激光控制器的功率设置间隔。实验中采用计算机联合控制软件界面如图 7 所示。循环次数根据控制熔锥锥腰半径计算结果进行设置。单击“运行”, 步进电机控制器和激光器控制器开始按既定指令工作, CO_2 激光器出光, 平移台相背移动。整个过程由经过光学放大和电子放大后传送到监视器的图像或由图像采集卡在电脑显示器上

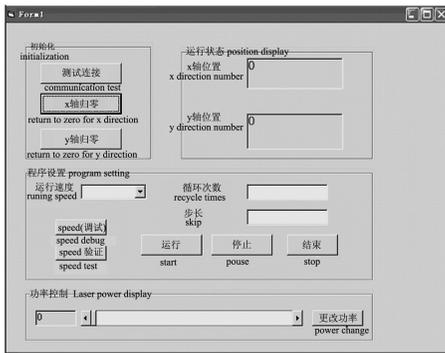


图 7 步进机与光功率计算机联合控制界面

Fig. 7 Combination control form for magnetic stepping motor and laser power

显示的图像进行观察。如果在整个循环次数运行过程内无误, 当循环至最大次数后, 平移台停止运行且激光器逐渐降低为零, 激光关闭输出。实际操作证明该系统软件与硬件之间可以协调工作。

加工过程结束, 待熔锥光纤冷却后, 将其从夹具中取下, 进行观测。加工出的成品被置于生物显微镜下观察其外貌, 并可用于配套的软件, 拍摄图片存档, 在经过像素长度校准后, 通过这些图片可以对锥腰以及过渡区形貌进行初步测量。图 8 给出了对于一个加工样品的显微图片拼接后得到的全貌图。可以看出加工的熔锥光纤表面光滑, 双锥结构左右对称, 整个锥体轴对称无变形。过渡区形状测量结果与理论结果的偏差基本保持在 $\pm 3\%$ 以内, 很好地控制了熔锥形貌。

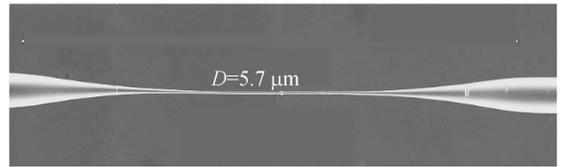


图 8 熔锥样品显微照片

Fig. 8 Magnified picture of a biconical-tapered fiber

5 结论

在 Timothy 的 CO_2 熔拉锥装置基础上通过采用短焦距聚焦透镜, 提高了光能的利用率。更换 LD 做激光指示器, 通过衍射条纹的观察提高了光纤与热源激光对准的精度。利用柱体 Mie 散射公式和 Grellier 的热传导模型, 确定了加工过程中激光功率增长与光纤拉伸距离之间的对应关系, 分段确定了仪器联合控制的参数, 简化了计算机对仪器控制的难度, 克服了设备在应用中最主要的问题。实验实现了步进机与光功率计算机联合控制, 得到锥腰直径 $2\sim 3 \mu\text{m}$ 左右的熔锥光纤, 较已报导 $10 \mu\text{m}$ 左右的锥腰直径^[8, 13] 有很大提高, 达到微腔器件以及光子晶体近场耦合器的尺寸要求。

参考文献:

- [1] RAO Y J, ZHU T, RAN Z L. Novel long-period fiber gratings written by high-frequency CO_2 laser pulses and applications in optical fiber communication[J]. *Optics Communications*, 2004, 229: 209-221.

- [2] WILLIAMSON R L, MILES M J. Melt-drawn scanning near-field optical microscopy probe profiles[J]. *J. Appl. Phys.* 1996, 80(9): 4804-4812.
- [3] PRESBY H M, EDWARDS C A. Near 100% efficient fiber microlenses[J]. *Electron Letters*, 1992, 28(6): 582-584.
- [4] BIRKST A, RUSSELL P ST J, PANNELL C N. Low power acoustic-optic device based on a tapered single mode fiber. [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1994, 6: 725-727.
- [5] IGNACIO R M, MANUEL L A, FRANCISCO M. Low-cost optical amplitude modulator based on a tapered single mode optical fiber [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(2): 228-234.
- [6] SPILLANES M, KIPPENBERG T J, VAHALA K J. Ultralow-threshold Raman laser using a spherical dielectric microcavity[J]. *Nature*, 2002, 415(7): 621-623.
- [7] BARCLAY P E, SRINIVASAN K, PAINTER O. Evanescent coupling from optical fiber tapers to photonic crystal waveguides and resonators[C]. *Conference on Lasers and Electro-optics*, 2003: 941-942.
- [8] TIMOTHY E D, GEORGE K, TIMOTHY A B. Carbon dioxide laser fabrication of fused-fiber couplers and tapers [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(33): 6845-6848.
- [9] GRELLIER A J C, ZAYER N K, PANNELL C N. Heat transfer modeling in CO₂ laser processing of optical fibers [J]. *Optics Communications*, 1998, 152: 324-328.
- [10] 帅词俊, 段吉安, 钟掘. 熔锥型光纤耦合器流变成形的工艺敏感性研究[J]. 光学精密工程, 2005, 31(1): 40-46.
SHUAI C J, DUAN J A, ZHONG J. Technical sensitiveness in the rheological manufacture progress of fused taper coupler[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 31(1): 40-46.
- [11] BOHERN C F, HUFFMAN D R. *Absorption and scattering of light by small particles* [M]. New York: Wiley, 1998.
- [12] TIMOTHY A B, YOUWEI L. The shape of fiber tapers[J]. *Journal of Light-wave Technology*, 1992, 10(4): 432-438.
- [13] KAKARANTZAS G, DIMMICK T E, BRICKS T A. Miniature all-fiber devices on CO₂ laser microstructuring of tapered fiber[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(15): 1137-1139.

作者简介: 刘丽飒(1978-), 女, 河北秦皇岛人, 厦门大学物理系博士研究生, 主要从事微型光纤器件研究;

蔡志平(1965-), 男, 厦门大学电子工程系教授, 博士生导师, zpc@jingxian.xmu.edu.cn