

基于多模干涉效应的可调谐大模场光纤激光器

潘玉寨¹ 刘晓莉² 苏晓慧¹ 黄雪骄¹

(¹哈尔滨工业大学(威海)光电科学系, 山东 威海 264209; ²焦作大学机电工程学院, 河南 焦作 454000)

摘要 研究了基于多模干涉效应的线形腔可调谐掺镱双包层光纤激光器。激光器主要由单模光纤-多模光纤-平面反射镜构成的多模干涉光纤反射器、大模场面积掺镱双包层光纤、宽带介质全反镜和 3 dB 输出耦合器构成。通过移动反射镜改变多模干涉光纤反射器的峰值波长实现了光纤激光器的可调谐输出。利用 974 nm 光纤输出半导体激光器作为抽运源, 实验获得了从 1038.82 nm 到 1071.06 nm 的不同激光波长输出, 可调谐范围近 32 nm, 3 dB 带宽约为 0.2 nm, 平均输出功率为 430 mW, 激光器斜效率约为 31%。

关键词 激光器; 可调谐双包层光纤激光器; 多模干涉效应; 大模场面积双包层光纤

中图分类号 TN253; TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0402003

Tunable Large-Mode-Area Fiber Lasers Based on Multimode Interference Effect

Pan Yuzhai¹ Liu Xiaoli² Su Xiaohui¹ Huang Xuejiao¹

¹ Department of Optics and Electronics Sciences, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai, Shandong 264209, China

² College of Mechanical and Electrical Engineering, Jiaozuo University, Jiaozuo, Henan 454000, China

Abstract A widely tunable linear-cavity double-cladding Ytterbium-doped fiber laser based on multimode interference (MMI) effect is reported. The laser cavity consists mainly of MMI fiber reflecting element, which is composed of single-mode fiber, multi-mode fiber and broadband metal reflecting mirror, double-cladding Ytterbium-doped large-mode-area (LMA) fiber, broadband dielectric total reflecting mirror and 3 dB output coupler. The wavelength tuning of fiber lasers is realized by moving the mirror in MMI fiber reflecting element, which is changing the reflection peak wavelength. A wavelength tuning range of about 32 nm ranging from 1038.82 nm to 1071.06 nm is experimentally demonstrated by utilizing the optical spectral analyzer, with the 3 dB linewidth of 0.2 nm and the signal-to-noise ratio of roughly 40 dB. The average output optical power of 430 mW is obtained with 1.5 W of the launched pump power at 974 nm, and the slope efficiency is about 31%.

Key words lasers; tunable double-cladding fiber laser; multimode interference effect; large-mode-area double-cladding fiber

OCIS codes 140.3510; 230.7408; 350.2460; 140.3600

1 引言

可调谐光纤激光器具有结构紧凑、大输出功率范围、优良光谱特性和高光效率的特性, 在光纤通信密集波分复用(DWDM)系统、光纤传感、光谱学分析、环境监测、光学相干成像(OCT)等领域有广泛的应用^[1,2]。用于光纤激光器的波长可调谐机制较多, 主要包括光纤光栅滤波型^[3]、光纤法布里-珀罗(F-P)腔滤波型^[4]及各种外腔干涉装置。

近年来, 可调谐光纤激光器研究中出现了一种

新型可调谐光纤结构, 这种光纤结构的可调谐机制是基于光纤多模干涉效应(MMI), 也称自映像效应。多模干涉结构在光纤领域的研究通常包括光波导器件^[5]、光纤传感^[6,7]、光纤滤波器^[8,9]及制作光纤透镜^[10]。多模干涉光纤结构制作简单, 便于在光纤激光器领域应用, 利用其滤波特性进行选模, 可实现单模激光输出^[11,12]。光纤多模干涉效应易受光纤纤芯直径及折射率、光纤长度及弯曲度的影响, 通过对相关量的控制可实现光纤激光的波长调谐输

收稿日期: 2012-10-25; **收到修改稿日期**: 2012-12-24

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2010FQ017), 哈尔滨工业大学科研创新基金(HIT.NSRIF.2009146)和威海市科技计划(2011DXGJ09)资助课题。

作者简介: 潘玉寨(1976—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光纤激光及其应用技术方面的研究。E-mail: panyzh2002@163.com

出^[13~16]。

利用多模干涉效应实现光纤激光器可调谐输出的研究主要集中于1.55 μm和1.06 μm波段。在1.55 μm波段,采用无芯多模光纤制作多模干涉结构,可增大光纤折射率差和光纤直径,实现较窄的激光线宽,Castillo-Guzman等^[13]利用单模光纤-多模光纤-单模光纤(SMS)型光纤结构制作了可调谐环形腔掺铒光纤激光器,实现了1549~1609 nm的激光输出,波长可调谐范围达60 nm,信噪比为40 dB,激光线宽为0.4 nm;通过延长多模光纤长度,利用偏振控制方式也可实现光纤激光器的波长调谐输出,2011年郝艳萍等^[14]利用2.4 m长的多模光纤经缠绕后加入环形腔掺铒光纤激光器中,通过调整偏振控制器实现了1542~1560 nm的18 nm可调谐激光输出,信噪比大于40 dB,输出功率约为30 mW,3 dB带宽只有0.096 nm,这是目前采用多模干涉光纤结构实现的最窄线宽。1.06 μm波段的研究报道始于2005年,Selvas等^[16]采用单模光纤-多模光纤-宽带金属反射镜的光纤结构和16 m的双包层掺镱光纤制作成线形腔光纤激光器,实现了1088~1097 nm、波长可调谐范围为8 nm的激光输出,平均输出功率达500 mW,转换效率约为26%,激光线宽为0.5 nm,2006年Selvas等^[16]通过优化金属反射镜将调谐范围提高到12 nm,他们采用的多模光纤长度较短且腔损耗较大,导致激光波长可调谐范围较窄且效率略低,该研究将多模干涉光纤结构成功应用在大功率可调谐双包层光纤激光器领域。

对于多模干涉效应,若采用大模场面积光纤作为输入光场,其单模模场面积更大,在多模光纤中将激励起更少的高阶模式,多模干涉具有更高的反射效率和更窄干涉带宽。因此,本文采用与Selvas等相似的多模干涉光纤反射结构,大模场面积(LMA)掺镱双包层单模光纤作为增益介质和多模干涉结构的输入光场,975 nm尾纤输出的半导体激光器作为抽运源,制作了基于多模干涉效应的可调谐线形腔双包层光纤激光器。

2 多模干涉光纤反射结构原理及可调谐机制分析

实验中制作的多模干涉反射镜结构如图1(a)所示,图中单模光纤为LMA双包层光纤,纤芯直径为10 μm,数值孔径为0.08,Nufern公司生产的阶跃型多模光纤纤芯直径为105 μm,数值孔径为0.22。LMA双包层单模光纤即作为信号光的输入光纤,又作为输出光纤,多模干涉效应发生在多模光纤中。在多模光纤和平面反射镜中间填充折射率匹配液,消除因空气间隔引入的相位差,即构成多模干涉光纤反射结构。

采用导模传输分析法^[17],在不考虑光纤辐射模影响的情况下,多模光纤内部光场可表示为

$$E(r, L) = \sum_{m=1}^n a_m E_m(r) \exp(j\beta_m L), \quad (1)$$

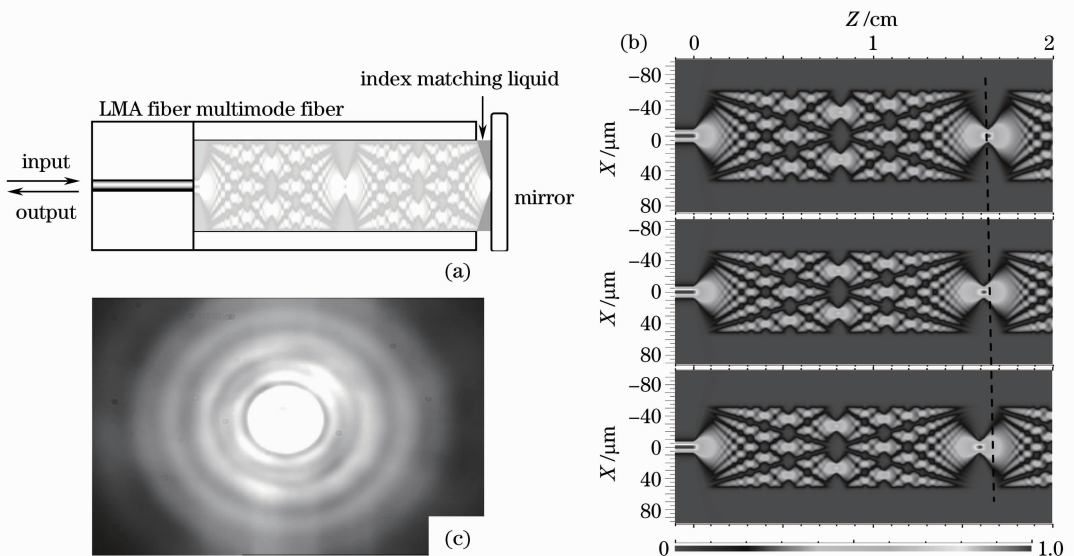


图1 结构原理图。(a)多模干涉光纤反射器;(b)多模干涉BMP模拟图;(c)由CCD拍得多模光纤端面的干涉图
Fig.1 Principle diagram. (a) MMI fiber reflecting element; (b) field distribution of MMI based on BMP simulation; (c) field map of MMI captured by CCD camera

式中 $E_m(r)$ 代表多模光纤中第 m 阶模式振幅; a_m 代表多模光纤激发高阶模式的激励系数, 与单模光纤入射光场有关; n 代表激励起的高阶模式数目。由于各高阶模式的激励系数和传播常数 β_m 不同, 使得光纤中存在复杂的光场分布。但不同位置处各高阶模式具有不同的相位差, 当相位差满足 2π 的整数倍时, 各高阶模式之间产生干涉, 即在光纤轴上实现输入光场的自映像, 此时干涉波长 λ 与多模光纤长度 L 之间满足如下关系:

$$\lambda = p \cdot \frac{d^2 n_{\text{core}}}{L}. \quad (2)$$

式中 d 和 n_{core} 分别为多模光纤纤芯直径和折射率, p 为正整数。理论分析表明, 自映像点处光场强度最大, 且自映像点位置、光场强度与入射光波长及光纤参数有关。若将多模光纤在自映像点处切断并放置全反射镜, 则从多模光纤反射的信号光将具有最大的反射强度, 需要对光纤长度进行精确切割, 利用普通光纤切割设备是难以达到的。文中多模光纤的切割长度略小于自映像点长度, 在多模光纤与反射镜间滴入折射率匹配液消除光纤端面与反射镜之间空气层的影响。实验测试多模干涉光纤反射结构在 1064 nm 处的最大反射效率为 70%。

图 1(b) 为采用 BMP 模拟软件对 $p=1$ 、入射波长不同时光场分布的仿真结果, 从上自下入射波长分别为 1045、1060、1075 nm; 仿真结果显示不同波长时自映像点位置不同, 波长越长, 距离越短, 呈线性关系。图 1(c) 为用 CCD 拍得的多模光纤端面光场分布情况, 可观察到明显的干涉图像。

从(2)式可知, 不同光波长将在多模光纤光轴不同位置上产生自映像。从单模光纤进入多模光纤的初始信号光为宽带荧光, 每个波长将在光轴上形成各自的自映像点。当平面反射镜的位置固定在某一

波长自映像点处时, 该波长具有最大的反射效率, 为峰值反射波长。将该结构接入光纤激光器腔内, 峰值反射波长的信号光在模式竞争过程中占优势, 使其具有最低的激射阈值, 从而容易获得该波长激光输出。若将平面反射镜固定在微位移平台上, 通过改变反射镜和光纤端面的距离, 多模干涉光纤反射器的峰值反射波长将随之改变, 可从光纤增益光谱中选出不同的峰值反射波长, 而抑制同一时刻增益光谱中其他波长。

3 可调谐大模场面积双包层光纤激光器结构

如图 2(a) 为采用的可调谐线形腔 LMA 双包层光纤激光器的实验装置。抽运源为尾纤输出 974 nm 半导体激光器, 光纤直径为 105 μm , 数值孔径为 0.22。与深圳众望达公司生产的 PPM plus signal mirror 耦合系统相连接, 该耦合系统由双透镜、介质反射镜及输入输出光纤构成, 可实现抽运光耦合进入双包层光纤及 1020~1120 nm 信号光的全反射功能。双透镜及介质全反镜封装于一体, 并制作成尾纤输出结构, 输入端多模光纤与抽运源相同, 输出端采用与增益光纤匹配的 LMA 无源光纤。经实验测试其耦合效率约为 78%。增益光纤为 Nufern 公司的掺镱 LMA 双包层单模光纤, 长度为 3 m, 纤芯和双包层直径分别为 10 μm 和 125 μm , 数值孔径为 0.08 和 0.45, 在 974 nm 处的吸收系数为 4.8 dB/m。将增益光纤与耦合系统的输出光纤熔接, 实现抽运光的输入。增益光纤输出端连接与增益光纤同结构的大模场面积无源光纤制作的 3 dB 耦合器, 波长范围为 ± 15 nm, 耦合比为 50.8/49.1, 插入损耗约为 3.5 dB, 外部损耗约为 0.15 dB。耦合输出光纤、增益光纤及 3 dB 耦合器所用光纤均为

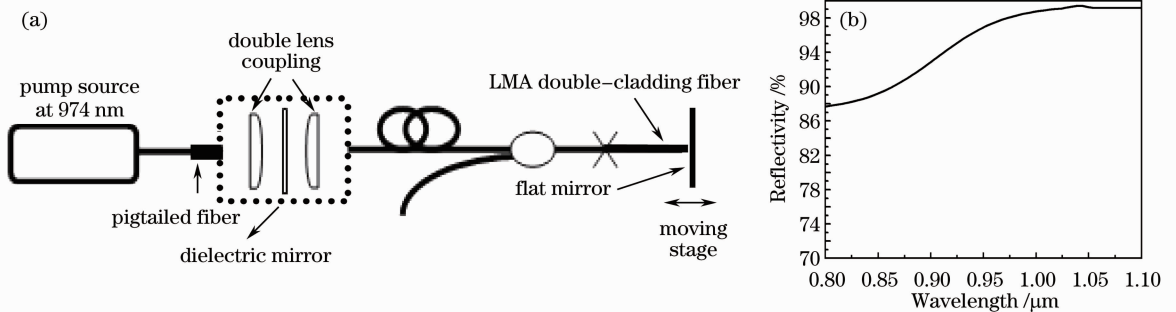


图 2 激光器结构图及平面镜反射曲线。(a) 激光器结构图; (b) 反射率曲线

Fig. 2 Experimental setup and mirror reflecting curve. (a) Experimental setup of the fiber lasers; (b) reflectivity curve of mirror

同结构,连接损耗小于 0.1 dB,将 3 dB 耦合器的 50.8% 端连接多模光纤,测试连接损耗约为 0.5 dB,另一端作为输出。将多模光纤输出端和金属平面反射镜固定于光纤耦合调整架上,平面反射镜的镀膜为增强型铝膜,其红外波段的反射曲线如图 2(b) 所示,在 1060 nm 附近的反射率在 99% 左右,且在所研究红外波段基本不变。

将实验中多模光纤的纤芯直径和折射率以及激光工作波长代入(2)式可得自映像点位置: $L = p \times 15.289$ mm,不同 p 值对应不同自映像点序数位置。理论分析表明,选取不同 p 值,自映像点处的光场强度不同,多模干涉光纤反射结构的滤波特性不同,其带宽、插入损耗、可调谐范围等参数随信号光波长和光纤长度及折射率发生变化^[11,12],在信号光波长

和光纤纤芯直径和折射率一定时,选择 $p = 1$ 时多模光纤长度短,切割过程中精度难保证, p 值过大,自映像点处的光场强度变弱,同时损耗增加。针对工作波段在 1060 nm 附近,实验中选择 $p = 2$,对应多模光纤长度 $L = 30.578$ mm,故多模光纤选择的切割长度为 30 mm,将切割后的多模光纤放在光学显微镜下测量,其长度为 30.16 mm。

4 测试结果分析和讨论

实验过程中,将平面反射镜的位置调整旋钮置于某一位置,打开抽运光电源,调整抽运光输出功率直到出现激光,改变反射镜与多模光纤端面距离,观察激光输出波长的可调谐现象。并对相关数据进行测试,测试结果如图 3 所示。

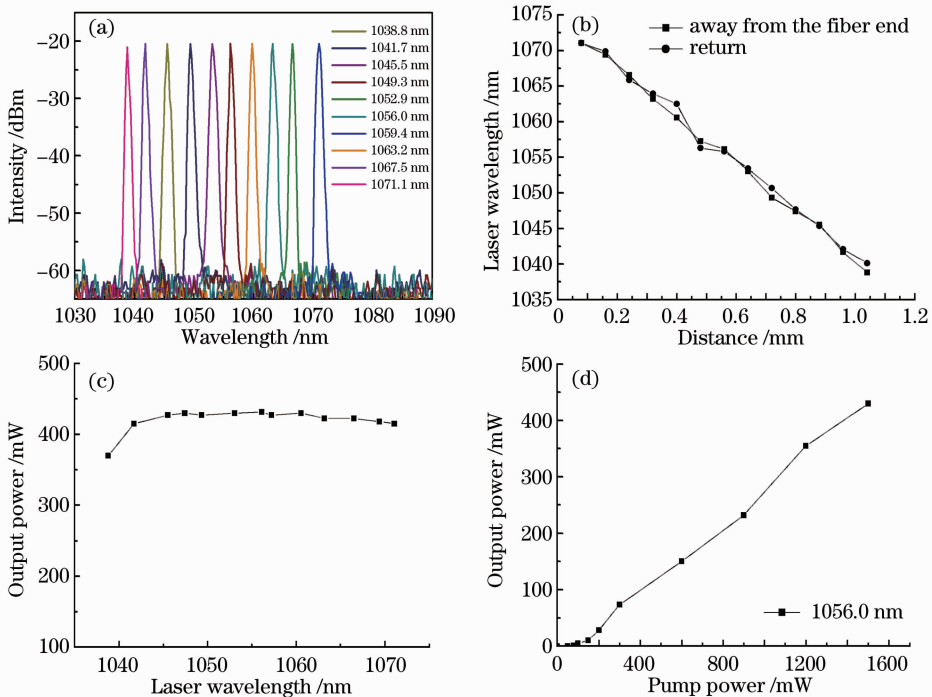


图 3 激光器输出特性。(a)输出光谱;(b)输出波长与位移量;(c)不同波长输出功率;(d)输出功率与抽运功率
Fig. 3 Output characteristics of the lasers. (a) Output spectra; (b) wavelength versus distance; (c) output power versus wavelength; (d) output power versus input power

图 3(a)为抽运功率为 1 W 时,随反射镜位移得到激光输出光谱,所用光纤光谱仪为 YOKOGAWA 公司的 AQ6370B。实验显示随反射镜移动,激光光谱是连续变化的。反射镜每移动 0.08 mm,测试并记录一次激光光谱。实验过程中激光输出光谱可以从 1038.82 nm 移动到 1071.06 nm,可调谐范围约为 32 nm,基本覆盖了整个增益带宽。每个光谱峰值波长强度基本相同,激光光谱线宽平均约为 0.2 nm,单波长的信噪比(边模抑制比)接近 40 dB。

实验过程中并没有观察到抽运光,这是因为双包层光纤中未吸收的抽运光中大部分在多模干涉光纤反射结构中损失掉。当多模光纤与反射镜之间距离超过 1.04 mm 时和反射镜距离非常接近多模光纤端面时,没有观察到激光输出,这是由腔内损耗、增益带宽及多模干涉光纤结构共同作用的结果。

光纤激光器输出波长与位移量的关系显示在图 3(b)中,图中给出了远离光纤端面时和靠近光纤端面的两条关系曲线。实验结果显示反射镜与多模

光纤的端面越近,其输出波长越长。中心波长与距离之间近似呈线性关系,与理论分析一致。由于光纤调整架的精度限制,使得测试结果与理论分析有一定偏差。

图 3(c)为光纤激光器输出不同波长时的激光功率,在抽运功率为 1.5 W 时,调整反射镜位置观察波长变化,同时用功率计记录输出功率,平均输出功率约为 430 mW,实现过程中并没有发现 3 dB 耦合器性能下降现象。1038.82 nm 处的输出功率下降较多,此时平面镜距离光纤端面最远,其反射损耗大,且该波长已经处于增益带边,3 dB 耦合器的带宽限制其耦合效率。在长波长处,即距离接近 0 时,反射损耗虽较小,但该波长已经接近增益带边,且光纤端面与反射镜间存在 F-P 腔效应的抑制作用,使其功率有所下降。实验过程没有观察到更长的波长输出。选择 1056.0 nm 波长输出时,测试了输出功率与输入抽运功率的关系曲线,如图 3(d)所示,激光器斜效率约为 31%。进一步增大抽运光功率,激光器输出功率也随之增大,但通过光谱观察发现,超过 1.5 W 时,虽然多模干涉光纤反射结构仍然可以实现波长调谐,但激光光谱开始出现 2 个波长,甚至 3 个波长,说明随激光增益增大,多模干涉光纤反射结构不能够抑制激光腔内其他模式竞争。

5 结 论

利用单模光纤-多模光纤-平面反射镜制作了多模干涉光纤反射器结构,并采用 3 m 长的大模场面积掺镱双包层单模光纤,制作了线形腔结构可调谐双包层光纤激光器,实现了从 1038.82 nm 到 1071.06 nm 的波长输出,可调谐范围约为 32 nm,平均输出功率约为 430 mW,激光器斜效率约为 31%。当抽运功率越过 1.5 W 时,激光器输出不再保持单波长。由于激光器整体结构中,抽运光耦合损耗、单模光纤与多模光纤的连接损耗、多模干涉反射效率等损耗因素的存在,激光器的整体效率不高,通过改进激光器整体结构,如采用光纤套管提高光纤端面与反射镜的平行度,或采用高效率多模合束器提高抽运光的耦合效率,可以有效提高激光器转换效率。上述实验结果进一步证实了利用大模场面积单模光纤制作多模干涉光纤结构可实现高性能的宽带可调谐双包层光纤激光器。

参 考 文 献

1 J. Nilsson, W. A. Clarkson, R. Selvas *et al.*. High power,

- wavelength-tunable, cladding-pumped, rare-earth doped silica fiber laser[J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2004, **10**(1): 5~30
- 2 Liu Yinggang, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an *et al.*. Tunable fiber laser and its application in optical fiber sensing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(8): 44~47
- 刘颖刚, 乔学光, 贾振安等. 可调谐光纤激光器及其在光纤传感中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2006, **43**(8): 44~47
- 3 Jiang Meng, Zhang Weigang, Jin Long *et al.*. Wavelength tunable band-pass filter based on chirped fiber grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 873~878
- 姜萌, 张伟刚, 金龙等. 基于啁啾光纤光栅的波长可调谐带通滤波器[J]. 中国激光, 2009, **36**(4): 873~878
- 4 Su Liqin, Shen Yonghang. Investigation on a novel Fabry-Perot filter for high power tunable fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2351~2354
- 苏立钦, 沈永行. 适用于高功率可调谐光纤激光器的法布里-珀罗滤波器研究[J]. 中国激光, 2010, **37**(9): 2351~2354
- 5 Pan Jianxia, Sun Yiling. Analysis of the fully destructive interference of overlapping-images in MMI couplers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(6): 3300~3305
- 潘剑侠, 孙一翎. 多模干涉耦合器中重叠像相干相消现象分析[J]. 物理学报, 2007, **56**(6): 3300~3305
- 6 Enbang Li. Temperature compensation of multimode-interference-based fiber device[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(14): 2064~2066
- 7 Ying Zhang, Weiwen Zou, Xinwan Li *et al.*. Modal interferometer based on tapering single-mode-multimode-single-mode fiber structure by hydrogen flame[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2012, **10**(7): 070609
- 8 J. E. Antonio-Lopez, A. Castillo-Guzman, D. A. May-Arrijoa *et al.*. Tunable multimode-interference bandpass fiber filter[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(3): 324~326
- 9 Peng Shijun, Liu Yanan, Xue Jinlai *et al.*. Design of multi-mode fiber tunable optical filter based on strain[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0505004
- 彭石军, 刘亚南, 薛金来等. 基于应变的多模光纤可调谐光纤滤波器设计[J]. 中国激光, 2011, **38**(5): 0505004
- 10 Waleed S. Mohammed, Alok Mehta, Eric G. Johnson. Wavelength tunable fiber lens based on multimode interference[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(2): 469~477
- 11 X. Zhu, A. Schulzgen, H. Li *et al.*. High-power fiber lasers and amplifiers based on multimode interference[J]. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, **15**(1): 71~78
- 12 B. M. Shalaby, V. Kermene, D. Pagnoux *et al.*. Transverse mode control by a self-imaging process in a multimode fibre laser using a single-mode feedback loop[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2008, **10**(11): 115303
- 13 A. Castillo-Guzman, J. E. Antonio-Lopez, R. Selvas-Aguilar *et al.*. Widely tunable erbium-doped fiber laser based on multimode interference effect[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(2): 591~597
- 14 Hao Yanping, Zhang Shumin, Wang Xinzhan *et al.*. Tunable erbium-doped fiber laser based on multi-mode fiber filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0814006
- 郝艳萍, 张书敏, 王新占等. 基于多模光纤滤波器的可调谐掺铒光纤激光器[J]. 光学学报, 2011, **31**(8): 0814006
- 15 G. Anzueto-Sanchez, A. Martinez-Rios, D. A. May-Arrijoa *et al.*. Enhanced tuning mechanism in fiber laser based on multimode interference effect [J]. *Electron. Lett.*, 2006, **42**(23): 1337~1338
- 16 R. Selvas, I. Torres-Gomez, A. Martinez-Rios *et al.*. Wavelength tuning of fiber lasers using multimode interference effects[J]. *Opt. Express*, 2005, **30**(13): 9439~9445
- 17 L. B. Soldano, E. C. M. Pennings. Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(4): 615~627

栏目编辑: 王晓琪