

文章编号: 0258-7025(2007)03-0345-05

切换式双波长激发在掺镱和铒镱共掺复合式光纤激光器中的实现

种兰祥^{1,2}, 李建郎³

¹ 西北大学信息科学与技术学院, 陕西 西安 710069

² 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710068; ³ 电气通信大学激光科学研究所, 日本 东京 182-8585

摘要 抽运旁通腔型的掺镱光纤(YDF)激光器内剩余的抽运光功率随着入射抽运功率的变化呈现出光学双稳特性,这导致了用它来抽运另一个分叉腔的铒镱共掺光纤(EYDF)增益介质可获得第二个信号波长激发的可能性。根据这一原理,从实验上获得了1040 nm和1537 nm两个激发线的可切换振荡,这表明基于掺镱光纤激光器光学双稳态的复合腔结构(掺镱光纤激光器的抽运旁通腔和铒镱共掺光纤分叉腔)是实现切换式双波长光纤激光器光源的一个简单有效的方法。

关键词 激光技术;光纤激光器;光学双稳;双波长切换式激发

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Simple Realization of Switchable Two-Wavelength Yb-Fiber and Er/Yb-Fiber Hybrid Laser

ZHONG Lan-xiang^{1,2}, LI Jian-lang³

¹ College of Information Science and Technology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China

² Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710068, China

³ Institute for Laser Science, University of Electro-Communications, Tokyo 182-8585, Japan

Abstract The bistable feature of unabsorbed pump in pump-bypassed Yb-doped fiber (YDF) laser offers a possibility to pump the Er/Yb co-doped fiber (EYDF) in a bifurcated cavity. By this way, the lasing of the second lasing line is in a switching mode with that of 1040 nm lasing line. In this paper the wavelength-switchable lasing of 1040-nm and 1537-nm dual lines is investigated experimentally, and the results suggest that a switchable two-wavelength source could be accomplished efficiently by combining the bistable feature of Yb-doped fiber laser with the hybrid cavity configuration (pump-bypassed cavity plus the bifurcated cavity).

Key words laser technique; fiber laser; optical bistability; switchable two-wavelength source

1 引言

光学双稳在光通信与逻辑信号处理等方面有着重要应用。利用光纤介质的各种非线性效应(如克尔效应^[1~4]、互相位调制^[5]及非线性吸收^[6~11]等)可获得光学双稳。迄今为止,研究有源光纤中的双稳现象主要是针对铒离子掺杂的光纤激光器,其主导的物理机制主要来源于铒离子对信号波长的非线性(或者饱和)吸收。文献[12]已经指出,饱和吸收是

(准)三能级离子掺杂介质的一个基本性质,因此,对基于这些基质离子掺杂的光纤(除掺铒光纤)激光器中的光双稳行为进行的研究可以满足光纤光学领域中不同的应用需求。然而对其他(准)三能级离子掺杂的光纤(例如掺镱光纤)激光器中的光学双稳行为却鲜见报道。

此外,一些应用像差分吸收光谱^[13, 14]、跳频光通信^[15]和光学仪器检测等都需要一个紧凑型且能允许在两个或多个激发波长输出之间切换的光纤激

收稿日期:2006-07-20;收到修改稿日期:2006-09-13

作者简介:种兰祥(1960—),男,陕西合阳人,副教授,博士研究生,主要从事物理电子和光电子方面的研究。

E-mail:lan_xiang@263.sina.com

光源。一种实现双波长切换振荡的主要方法是利用各种内腔选频部件(由级联的光纤布拉格光栅(FBG)构成的叠加法布里-珀罗谐振腔、梳状滤波器、对应力或偏振敏感的光纤光栅等)来选择激发线输出^[16~21]。然而,由于多个激发线(≥ 2)共享同一光纤增益介质,而光纤介质的增益展现出均匀的增宽特性,各激发线几乎具有相同的抽运阈值,因此需要采取繁琐的手段来抑制这些激发线的同时振荡,这减少了光纤在各种环境中获得应用的弹性。

最近,作者报告了基于抽运旁通腔结构的掺镱光纤激光器中的光学双稳现象^[22]。该激光腔由增益段和吸收段的掺镱光纤(YDF)两部分组成,未被前者吸收的抽运光被波分复用器(WDM)(置于增益段和吸收段掺镱光纤之间)旁路出来而形成一个分叉的结构。实验表明,在一定的条件下,随着入射抽运功率的变化,1040 nm激光信号功率和剩余(未吸收)的抽运光功率都呈现各自的双稳态,并且剩余的抽运光功率的输入输出滞后回线与1040 nm信号功率的输入输出滞后回线相位相反。因此,通过利用未被吸收的抽运光功率来抽运另一谐振腔内的增益光纤,可能实现两条激发线的开关式振荡。本文利用来自掺镱光纤激光器中的剩余抽运光来抽运分叉腔中的掺镱共掺光纤(EYDF),通过恰当地选取激光腔参数,获得了1040 nm和1537 nm两个激发线的开关振荡。

2 实验装置

实验装置如图1所示,其中使用了两个不同的单模石英掺镱光纤。增益段掺镱光纤 YDF1 长约 2 m,纤芯直径 $3.8 \mu\text{m}$,包层直径 $125 \mu\text{m}$,数值孔径 0.17,掺镱粒子数浓度 $3.13 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ 。所用抽运源是一个单模石英光纤耦合的 976 nm 激光二极管。吸收段的掺镱光纤 YDF2 纤芯直径 $6.3 \mu\text{m}$,包层直径 $125 \mu\text{m}$,数值孔径 0.14,掺镱粒子数浓度 $3.99 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ 。波分复用器被用来旁路掉 97.5%

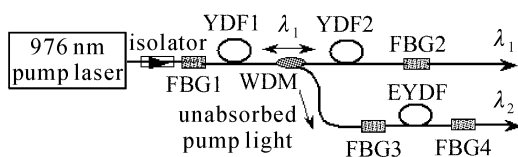


图1 基于抽运旁通腔掺镱光纤激光器和包含掺镱共掺光纤的分叉腔的双波长切换振荡实验装置

Fig. 1 Schematic diagram of a hybrid YDF and EYDF laser operating in wavelength-switchable mode

$$\lambda_1 = 1040 \text{ nm}, \lambda_2 = 1537 \text{ nm}$$

以上未吸收的抽运光,同时保持 99.2% 以上的 1040 nm 信号光在光路里。光纤布拉格光栅 FBG1 对波长为 1040 nm 的光高反而对波长为 976 nm 的抽运光则高透。输出耦合器 FBG2 对波长 1040 nm 的光有 90% 的反射率。当 YDF2 的长度为 2 m 时,整个激光腔长约 9.2 m。在测量了入射抽运光功率和剩余抽运光功率的函数关系后,波分复用器的 976 nm 端口随即被和另一个(分叉的)光纤谐振腔熔接在一起。后者由 FBG3, FBG4 和掺镱共掺单模石英光纤增益介质组成。所用的掺镱共掺光纤纤芯直径 $4.2 \mu\text{m}$,包层直径 $125 \mu\text{m}$,数值孔径 0.19,其对波长 976 nm 的吸收系数 $\alpha = 933 \text{ dB/m}$ 。FBG3 对波长 1537 nm 的光高反,对 976 nm 的抽运光则保持高透。输出耦合器 FBG4 对波长 1537 nm 的光有 90% 的反射率。两个裸露的光纤末端被打磨成 8° 的斜角,以减少出射光在这两个端面的背向反射。

3 实验结果与讨论

图 2 给出了当 YDF2 的长度为 2 m 时,1040 nm 信号光功率和未吸收抽运功率随入射抽运功率 P_{in} 的变化曲线。在第一转折点(FTP)处, $P_{\text{in}} = 370 \text{ mW}$,在第二转折点(STP)处, $P_{\text{in}} \approx 48 \text{ mW}$ 。当 P_{in} 从零增加到小于第一转折点的功率值时,1040 nm 的信号光功率一直保持在极低的功率水平(图 2(a)下行支),而剩余的抽运光功率则很高并随 P_{in} 正比例增加(图 2(b)上行支)。一旦 P_{in} 继续增加到大于第一转折点的功率值,1040 nm 的信号光功率突然跳升而剩余抽运光功率则突然降低。当

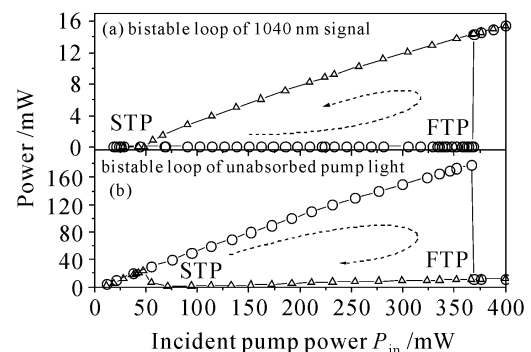


图2 1040 nm 激光信号功率和剩余抽运功率随 P_{in} 的变化(YDF2 长 2 m)
虚线箭头代表滞后环的演化方向

Fig. 2 1040-nm laser signal power and unabsorbed pump power as the functions of P_{in} (the length of YDF2 is 2 m)

Dashed arrows represent the evolutions of respective hysteresis loops

P_{in} 从大于第一转折点的功率值减小到相当于在第二转折点的功率值时, 1040 nm 的信号光功率一直保持在高的功率水平并随 P_{in} 成正比例线性变化(图 2(a)上行支), 而剩余抽运光功率继续保持在极低的功率水平(图 2(b)下行支)。由此可见, 抽运旁通的掺镱激光器的信号输出以及剩余的抽运光均展现了各自的双稳行为, 并且它们的输入输出双稳滞后回线的相位随着入射抽运功率的变化呈现出相反(顺时针与逆时针)的变化。关于输入输出双稳滞后回线更详细的描述解释可参考文献[22]。

设钕共掺光纤的长度为 L_{EYDF} , YDF1 和 YDF2 的长度分别为 L_{YDF1} 和 L_{YDF2} 。图 3(a)给出了当 $L_{EYDF} = 6.5$ cm, $L_{YDF1} = L_{YDF2} = 2$ m 时 1537 nm 激发线功率随 P_{in} 的变化曲线。当 P_{in} 从零增加到小于第一转折点的功率值时, 1537 nm 激光信号随 P_{in} 正比例增加并具有高的输出功率(图 3(a)上行支), 此时 1040 nm 信号无激光输出(图 2(a)下行支); 当 P_{in} 增加到大于第一转折点的功率值时, 1537 nm 激发线功率突然下跳到极低的功率水平(图 3(a)下行支), 而 1040 nm 的激发线开始输出(图 2(a)上行支)。当 P_{in} 从大于第一转折点的功率值减小到第二转折点, 1537 nm 激光信号功率继续保持在自己的下行支上, 而 1040 nm 激光信号功率保持在其上行支。比较图 2 和图 3(a)可以看出, 随着 P_{in} 的变化, 在介于 $STP < P_{in} < FTP$ 的抽运范围内, 1537 nm 激发线的输入输出滞后回线与剩余抽运光的输入输出滞后回线的进化方向相同, 而与 1040 nm 激发线的输入输出滞后回线进化方向相反。换句话说, 随着入射抽运功率的变化, 1537 nm 激光信号与 1040 nm 激光信号以切换式振荡的方式

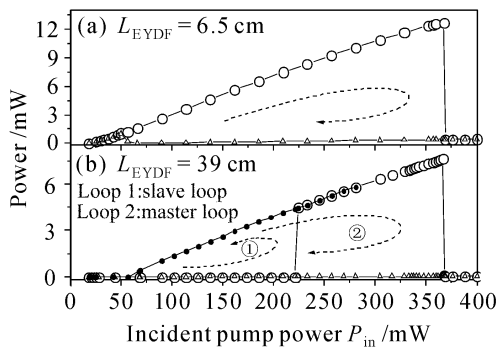


图 3 应用不同的钕共掺光纤长度时 1537 nm 激发线功率随入射抽运功率的变化
虚线箭头代表不同滞后环的演化方向

Fig. 3 1537-nm laser signal power as a function of P_{in}
Dashed arrows represent the evolutions of different hysteresis loops

发射。

1537 nm 激发线功率在 $L_{EYDF} = 39$ cm, $L_{YDF1} = L_{YDF2} = 2$ m 时随 P_{in} 的变化如图 3(b) 所示。当 P_{in} 从零逐渐增加到 221 mW (小于第一转折点) 时, 1537 nm 线功率突然跳变到其上行支, 而且只要 P_{in} 继续在大于 57 mW 小于第一转折点的范围之内变化, 该激发线总是保持在上行支。当 P_{in} 从零逐渐增加时, 把在抽运范围 $57 \text{ mW} < P_{in} < 221 \text{ mW}$ (宽度 164 mW) 内所导致的 1537 nm 功率双稳环称之为“从属”滞后回线, 这个从属双稳环源于增加钕共掺光纤长度后其低抽运部分的饱和和吸收(与此相似, 在 $L_{EYDF} = 6.5$ cm, $L_{YDF1} = L_{YDF2} = 2$ m 时, 同样在抽运范围 $17 \text{ mW} < P_{in} < 22 \text{ mW}$ 内出现一个内嵌的宽度约 4.8 mW 的“从属”滞后回线, 由于范围太小未能在图 3(a) 中画出)。当 P_{in} 继续增加到大于第一转折点的功率值时, 1537 nm 激光信号功率突然下跳, 分叉腔激光器停止激发, 而 1040 nm 激光信号突然振荡并输出高功率。当 P_{in} 从大于第一转折点减小到任何较低的抽运功率时, 1537 nm 信号持续保持无输出状态, 而 1040 nm 激光信号功率保持在其上行支。

当 $L_{YDF1} = 2$ m 时, 1040 nm 激发线功率的输入输出滞后回线宽度随 L_{YDF2} 的变化如图 4(a) 所示。当 $L_{YDF2} < 80$ cm, 1040 nm 信号功率和剩余抽运功率的双稳行为均不出现。当 $L_{YDF2} > 80$ cm 时, 第一转折点和第二转折点均上移到较高的抽运水平, 且第一转折点的位移较第二转折点大, 这样导致了双

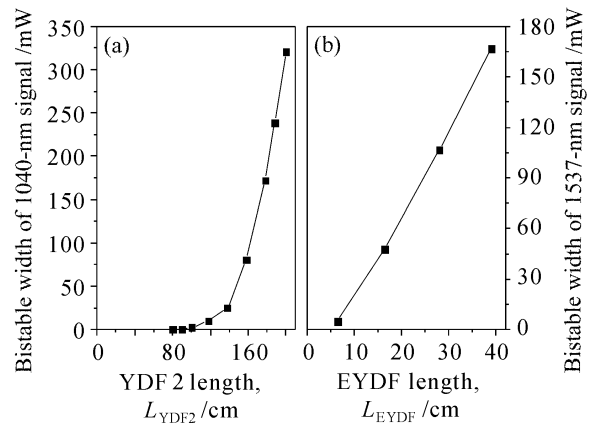


图 4

(a) $L_{YDF1} = 2$ m 时 1040 nm 信号输入输出滞后回线宽度随 L_{YDF2} 的变化; (b) $L_{YDF1} = L_{YDF2} = 2$ m 时 1537 nm 信号功率的从属滞后回线宽度随 L_{EYDF} 的变化

Fig. 4

(a) bistable width of 1040 nm signal power as a function of L_{YDF2} at $L_{YDF1} = 2$ m; (b) bistable width of 1537 nm signal power as a function of L_{EYDF} at $L_{YDF1} = L_{YDF2} = 2$ m

稳宽度随 L_{YDF2} 的增加而增大^[9]。图 4(b)给出了当 $L_{YDF1} = L_{YDF2} = 2$ m 时 1537 nm 信号功率的从属滞后回线的宽度随 L_{EYDF} 的变化。通过对图 4(b)中测得的数据进行数值外插拟合可知,在 $L_{YDF1} = L_{YDF2} = 2$ m 时,当 $L_{EYDF} < 5.3$ cm 时,1537 nm 信号功率的从属滞后回线消失,当 $L_{EYDF} > 5.3$ cm 时,其从属滞后回线的宽度与 L_{EYDF} 成正比。

图 5 为当 $P_{in} = 205$ mW, $L_{YDF1} = L_{YDF2} = 2$ m 和 $L_{EYDF} = 6.5$ cm 时所测得的 1040 nm 信号功率和 1537 nm 信号功率分别在各自的上行支时的光谱曲线。1040 nm 激发线的中心波长 (λ_c) 位于 1039.74 nm,光谱宽度约为 0.12 nm。实验测得的 1040 nm 信号光谱宽度对 P_{in} 的依赖关系由图 6 给

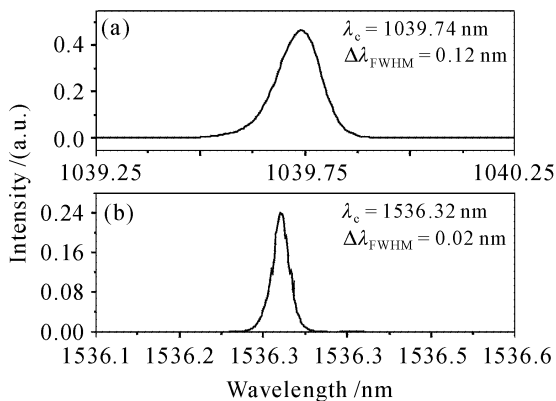


图 5 当 $P_{in} = 205$ mW, $L_{YDF1} = L_{YDF2} = 2$ m, $L_{EYDF} = 6.5$ cm 时实验所测得的 1040 nm 和 1540 nm 激发线光谱 (两个信号功率分别在它们各自的上行支线上)

Fig. 5 Measured spectra of 1040 nm and 1537 nm lines when the powers of these two lines are on their respective upper branches at $P_{in} = 205$ mW, $L_{YDF1} = L_{YDF2} = 2$ m and $L_{EYDF} = 6.5$ cm

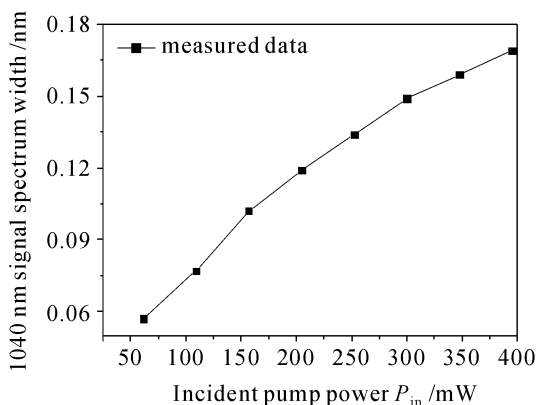


图 6 当 $L_{YDF1} = L_{YDF2} = 2$ m, $L_{EYDF} = 6.5$ cm, 且 1040 nm 信号功率在其上行支线上时所测得的 1040 nm 谱线宽度随 P_{in} 的变化

Fig. 6 Measured spectrum width of 1040 nm line as a function of P_{in} when this signal is on its upper branch at $L_{YDF1} = L_{YDF2} = 2$ m and $L_{EYDF} = 6.5$ cm

出,可以看出,当 P_{in} 增加时其谱线明显变宽。对于 1537 nm 激发线,中心波长 $\lambda_c = 1536.32$ nm,光谱宽度为 0.02 nm,光谱宽度较窄且已接近实验所用的 Ando AQ6317 光谱分析仪的 0.01 nm 分辨率。

4 结 论

在以前工作的基础上,作者利用准三能级掺镱光纤激光器中的光双稳行为,通过把抽运旁通掺镱光纤激光器腔以及铒镱共掺光纤激光器分叉腔结合起来,实现了 1040 nm 和 1537 nm 两个激发线的切换式振荡,同时给出了这两个激发线的双稳宽度与 L_{YDF2} 和 L_{EYDF} 的函数关系以及两个激发线各自的光谱特性。实验结果表明,基于掺镱光纤激光器光学双稳态的合成腔结构(掺镱光纤激光器的抽运旁通腔+铒镱共掺光纤分叉腔)是实现可切换双波长操作的一个简单有效的方法。

致谢 感谢植田宪一教授对于本研究工作给予的大力支持。

参 考 文 献

- Francisco J. Fraile-Pelaez, José Capmany, Miguel A. Muriel. Transmission bistability in a double-coupler fiber ring resonator [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(12):907~909
- Y. H. Ja. Kerr bistability in a 3×3 coupler optical fiber ring resonator [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(27):5310~5312
- Y. H. Ja. Multiple bistability in an optical-fiber double-ring resonator utilizing the Kerr effect [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(2):329~333
- F. Sanchez. Optical bistability in a 2×2 coupler fiber ring resonator; parametric formulation [J]. *Opt. Commun.*, 1997, **142**(4-6):211~214
- Y. Yosia, Shum Ping, Lu Chao. Bistability threshold inside hysteresis loop of nonlinear fiber Bragg gratings [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(13):5127~5135
- Liguo Luo, P. L. Chu. Optical bistability in a coupled fiber ring resonator system with nonlinear absorptive medium [J]. *Opt. Commun.*, 1996, **129**(3-4):224~228
- L. G. Luo, R. F. Peng, P. L. Chu. Optical bistability in a passive erbium-doped fiber ring resonator [J]. *Opt. Commun.*, 1998, **156**(4-6):275~278
- Moshe Horowitz, Ron Daisy, Baruch Fischer *et al.*. Linewidth-narrowing mechanism in lasers by nonlinear wave mixing [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(18):1406~1408
- Qinghe Mao, John W. Y. Lit. Optical bistability in an L-band dual-wavelength erbium-doped fiber laser with overlapping cavities [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(9):1252~1254
- Qinghe Mao, John W. Y. Lit. L-band fiber laser with wide tuning range based on dual-wavelength optical bistability in linear overlapping grating cavities [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(10):1252~1259
- Jung Mi Oh, Donghan Lee. Strong optical bistability in a simple L-band tunable erbium-doped fiber ring laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2004, **40**(4):374~377

- 12 Tso Yee Fan, Robert L. Byer. Modeling and CW operation of a quasi-three-level 946 nm Nd : YAG laser [J]. *IEEE. J. Quantum Electron.*, 1987, **QE-23**(5):605~612
- 13 Y. Shimose, T. Okamoto, A. Maruyama *et al.*. Remote sensing of methane gas by differential absorption measurement using a wavelength tunable DFB LD [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, **3**(1):86~88
- 14 Hu Shunxing, Hu Huanling, Zhang Yinchao *et al.*. Differential absorption lidar for environmental SO₂ measurements [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(9):1121~1126
胡顺星, 胡欢陵, 张寅超等. 差分吸收激光雷达测量环境 SO₂ [J]. *中国激光*, 2004, **31**(9):1121~1126
- 15 Habib Fathallah, Leslie A. Rusch, Sophie Larochelle. Passive optical fast frequency-hop CDMA communications system [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(3):397~405
- 16 Y. Z. Xu, H. Y. Tam, W. C. Du *et al.*. Tunable dual-wavelength-switching fiber grating laser [J]. *IEEE. Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(3):334~336
- 17 S. Yamashita, T. Baba. Spacing-tunable multiwavelength fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(16):1015~1017
- 18 Nathaniel J. C. Libatique, Ravinder K. Jain. Precisely and rapidly wavelength-switchable narrow-linewidth 1.5- μ m laser source for wavelength division multiplexing applications [J]. *IEEE. Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(12):1584~1586
- 19 Feng Xinhuan, Liu Yang, Sun Lei *et al.*. Switchable and spacing-tunable dual-wavelength erbium-doped fiber lasers [J]. *Chinese Phys.*, 2005, **14**(4):779~784
- 20 Yang Shiquan, Meng Hongyun, Yuan Shuzhong *et al.*. Wavelength changeable L-band Er-doped fiber laser using a high-birefringence fiber loop mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(10):868~870
杨石泉, 蒙红云, 袁树忠等. 由高双折射光纤环镜构成的可变波长输出的 L-波段掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(10):868~870
- 21 Feng Xinhuan, Sun Lei, Liu Yang *et al.*. Switchable and spacing-tunable dual-wavelength erbium-doped fiber laser using a PM fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2):145~148
冯新焕, 孙磊, 刘艳格等. 基于保偏光纤光栅的双波长掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2):145~148
- 22 J. L. Li, M. Musha, A. Shirakawa *et al.*. Strong optical bistability in ytterbium-doped fibre laser with reabsorption [J]. *Electron. Lett.*, 2006, **42**(8):449~450

征 订 启 事

第八届全国激光加工学术论文集——《中国激光》2007年增刊, 将于2007年3月出版。论文集较全面地反映了近年来我国激光加工技术研究、应用和产业化的最新成果, 包括激光连接(焊接、钎焊), 激光去除(切割、打孔、清洗、抛光等), 激光强化(合金化、熔覆、沉积等), 激光制备新材料, 激光快速成形与激光快速制造, 激光复合加工技术, 激光微纳米技术, 激光加工新技术与新应用, 激光加工过程检测与控制, 新型激光器件与光加工系统等领域, 作者来自于国内近40个大专院校、科研机构和企业。是广大激光加工领域工作者的非常有价值的参考资料。

论文集约400页, 定价100元, 进口雅光纸精印, 光盘版定价80元, 欢迎读者订阅。

联系人: 高先生 电 话: 021-69918253