

文章编号: 0258-7025(2010)04-0929-05

# Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺双包层光纤激光器谱组束 实验研究

楚兴春 赵尚弘 吴卓亮 石磊 李云霞 马丽华 张迪

(空军工程大学电讯工程学院网络工程系, 陕西 西安 710077)

**摘要** 报道了利用放置在外腔中的闪耀光栅实现两个不同长度 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺双包层光纤(EYDF)激光器谱组束的实验。外腔由两个二色镜和一个共用的部分反射镜构成,增益介质为 EYDF,外腔中的变换透镜可将光纤输出端按角度定位到闪耀光栅上,闪耀光栅实现光纤激光器的模式选择。实验进行了单个 EYDF 激光器的调谐,在 1532~1568 nm 范围内获得了稳定的单模输出,激光 3 dB 线宽均小于 0.08 nm,调谐范围约为 36 nm,接近 Er<sup>3+</sup> 的增益带宽。实现了两根长度分别为 6 m 和 8 m 的 EYDF 激光器的谱组束,在入纤抽运功率分别为 2.6 W 和 4 W 的条件下,获得了 480 mW 的谱组束输出。

**关键词** 激光技术;光纤激光;Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺双包层光纤;谱组束

**中图分类号** TN253;TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103704.0929

## Experimental Research on Spectral Beam Combination of Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> Co-Doped Double-Clad Fiber Lasers

Chu Xingchun Zhao Shanghong Wu Zhuoliang Shi Lei Li Yunxia Ma Lihua Zhang Di

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

**Abstract** Spectral beam combination of two Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> co-doped double-clad fiber (EYDF) lasers were experimentally studied through an outer resonator with a blazed grating placed in it. The outer resonator was formed by two dichroic mirrors and a partial reflector. Two EYDFs with different lengths were used as the gain element. A transform lens were employed to locate the output ends of the EYDFs in term of their incidence angle on surface of the blazed grating. The blazed grating was used to select the operating modes of the two EYDF lasers. The wavelength characteristics of a single EYDF laser were tuned experimentally. Stable output of single mode laser was achieved from 1532 nm to 1568 nm. The tunable range was about 36 nm and the 3 dB line width of the output lasers were all less then 0.08 nm. The output powers of the two EYDFs with lengths of 6 m and 8 m respectively were spectrally combined together. The combined output power of 480 mW was achieved on condition that the maximum pump powers coupled into the two fibers were 2.6 W and 4 W, respectively.

**Key words** laser technique; fiber lasers; Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> co-doped double-clad fiber; spectral beam combination

### 1 引 言

随着激光应用技术的发展,很多领域如激光武器、材料加工、空间光通信、遥感、激光雷达和光电对抗等都需要高功率、高质量和高亮度的激光束<sup>[1]</sup>。近年来,随着高功率半导体激光器抽运技术和双包层光纤制作工艺的发展,光纤激光器的输出功率得到极大提高,目前单根光纤激光器的输出功率已达千瓦量级<sup>[2,3]</sup>。由于受到非线性效应、光学损伤以

及热损伤等物理机理的影响,单根光纤的输出功率受到限制,并且随着激光器输出功率的提高光束质量也会变差<sup>[4,5]</sup>。激光组束技术被认为是大幅提升激光输出功率和亮度的有效手段,主要分为相干组束<sup>[6,7]</sup>和非相干组束<sup>[8,9]</sup>两大类。谱组束是非相干组束中的一类,利用衍射元件的谱选择性将多束频谱互不重叠的中小功率激光沿同一方向衍射,实现各激光器功率的近场和远场叠加。与相干组束系统

收稿日期:2009-03-30;收到修改稿日期:2009-08-10

基金项目:国家自然科学基金(60678018)和中国博士后科学基金(20070420220)资助课题。

作者简介:楚兴春(1972—),男,博士后,主要从事光电精密测量与激光技术方面的研究。E-mail:kejdcxc@sohu.com

相比,谱组束系统结构更为简单,组束阵元数目的变化不会引起光斑强度分布的变化,对元器件的精度和稳定性要求较低,无需复杂的相位检测和控制,因此谱组束技术是一种更为实用的提升激光输出功率的方法<sup>[10,11]</sup>。目前已有很多研究人员进行了光纤激光器的谱组束实验<sup>[8,11~13]</sup>,但这些实验大多采用掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤作为增益介质,主要原因是掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤具有较高的斜率效率(一般可达 80% 以上),容易实现高功率输出。相对而言,由于 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺双包层光纤(EYDF)的斜率效率较低,一般为 40% 左右,因此对 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺双包层光纤激光器进行谱组束的实验研究目前还鲜见报道。本文采用 EYDF 作为增益介质,利用闪耀光栅实验研究了其调谐特性,并且实现了两路 EYDF 激光器的谱组束,获得 480 mW 的组束输出,接近闪耀光栅的衍射效率。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示。谐振腔由两个二色镜(M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub>)和共用的部分反射镜组成,增益介质为 EYDF,光纤端面斜切以抑制菲涅耳反射,避免光纤端面与二色镜或输出耦合镜间形成谐振腔。M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub> 是全同二色镜,紧贴光纤输入端放置,它们对 1500~1600 nm 波长具有 95% 的反射率而对 976 nm 波长的透过率大于 98%;变换透镜 L 的焦距  $f=35$  mm,可将位于其前焦面上各光纤的输出端按角度定位到光栅上;光栅为 400 line/mm 的闪耀光栅,置于变换透镜的后焦面处,对 1500~1600 nm 范围内垂直入射的非偏振光具有 69% 的衍射效率,衍射角为 30°,用于实现模式选择,使各光纤激光器按照其衍射特性确定的波长工作;部分反射镜对 1500~1600 nm 波长有约 5% 的反射率,其法线与光栅衍射光方向重合,用于将部分输出光反馈回对应光纤以形成激光振荡。两个半导体二极管阵列激光器(中

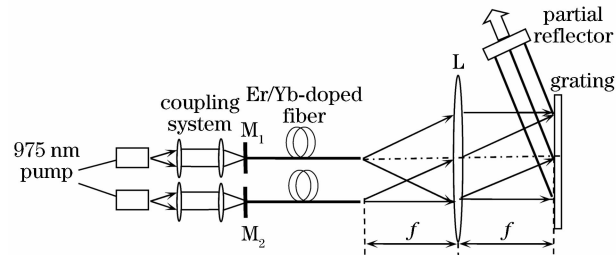


图 1 两路光纤激光谱组束实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup for spectral beam combining of two fiber lasers

心波长均为 976 nm) 作为抽运源,抽运光通过非球面镜和显微物镜组成的耦合系统进入光纤。所用的两根光纤为美国 NUFERN 公司生产的大模面积 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺双包层光纤,内包层直径为 300  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.46,纤芯直径为 25  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.1,长度分别为 6 m 和 8 m。输出光功率用光谱物理公司生产的 407A 功率计测量,用 Anritsu 公司的 MS9710B 光谱分析仪测量光谱,其最小分辨率为 0.07 nm。

## 3 调谐特性

要进行光纤激光的谱组束,首先必须实现单路光纤激光器在一定波长范围内的调谐输出。利用闪耀光栅作为波长选择器件,实验使用长度为 6 m 的光纤,实现了 36 nm 范围内的调谐,输出激光的 3 dB 带宽小于 0.08 nm,最大输出功率 360 mW。

当光路中未加入光栅和部分反射镜时,用光谱分析仪测得光纤输出端的荧光谱如图 2 所示,其范围约为 1530~1570 nm,这为较宽范围内的波长调谐提供了基础。

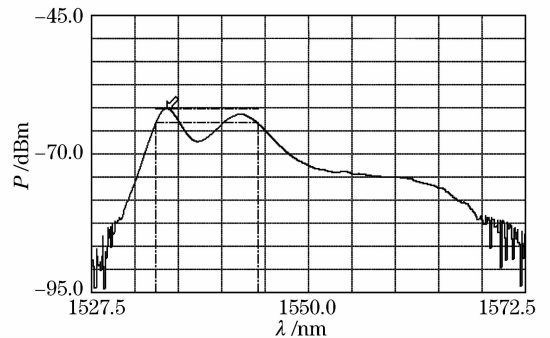


图 2 EYDF 的荧光谱

Fig. 2 Fluorescent spectrum of the EYDF

在光路中加入光栅和部分反射镜后,调节部分反射镜与光栅的相对位置使功率计读数达到最大值,此时得到的激光谱如图 3 所示,激光峰值位于 1543.86 nm 处,其 3 dB 带宽为 0.072 nm,接近光谱分析仪的最小分辨率。保持部分反射镜与光栅的相对位置不变,调节抽运功率的大小,测量不同抽运功率条件下的输出激光功率,结果如图 4 所示。当入纤功率逐渐增大至 1.1 W 左右时,开始有激光输出,表明该 6 m 光纤的激光阈值约为 1.1 W。随着入纤功率的增加,输出激光功率近似线性增加,当入纤功率达到最大值 2.6 W 时,最大输出激光功率为 360 mW,斜率效率约为 24%,低于厂家给定的斜率效率 35%。该差异主要是由于光纤长度没有优化

且光栅的衍射效率只有 69%造成的。光纤端面没有经过专业的抛光处理,其平整度较差也对斜率效率产生了一定的影响。

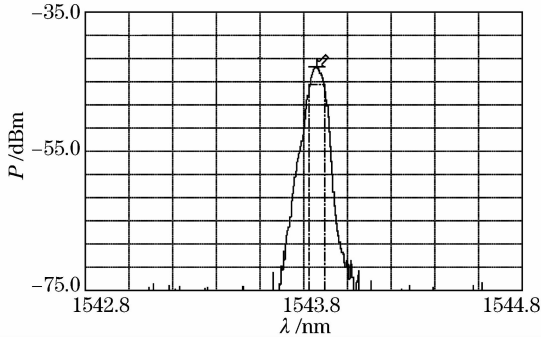


图 3 典型调谐输出光谱

Fig. 3 Typical output spectrum of the tuned EYDF

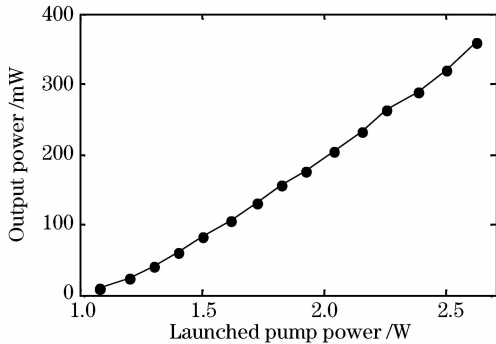


图 4 输出激光功率随入纤功率的变化曲线

Fig. 4 Input-output power curve of EYDF

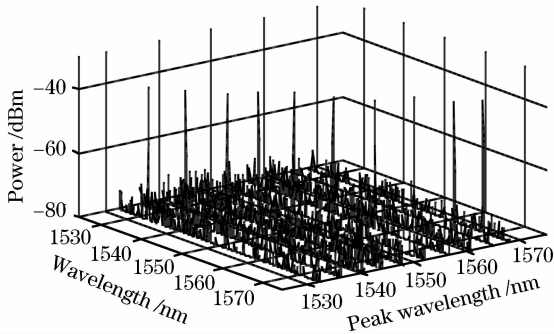


图 5 调谐输出激光光谱

Fig. 5 Output spectrum of the tuned EYDF

保持入纤功率为 2.6 W 不变,调整部分反射镜,实现激光器的调谐输出,对不同峰值的激光分别记录其输出光谱,结果如图 5 所示。可以看出,激光器在不同的工作波长下均获得了稳定的单模输出。调谐范围为 1532~1568 nm,跨度为 36 nm,接近整个荧光谱的带宽。虽然不同工作波长时激光谱的 3 dB带宽略有差异,但均小于 0.08 nm。图 6 给出了不同工作波长下相应的激光输出功率。可以看出,在 36 nm 的调谐范围内,不同工作波长时激光输出

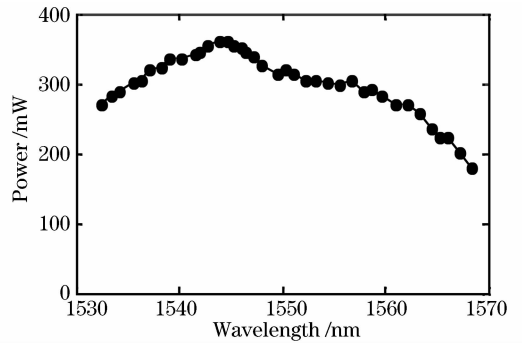


图 6 调谐激光功率随波长的变化曲线

Fig. 6 Output laser power versus operating wavelength

功率是不同的,即不同工作波长下增益不同,在 1568 nm 处激光输出功率仅为 180 mW,而在 1543.86 nm 时输出功率最大,达到 360 mW。因此在谱组束时,应使各激光器尽量工作在 1543 nm 附近,以期获得最大组束功率。

### 4 两路光纤激光器的谱组束

同时打开两个抽运源,仔细调节部分反射镜与光栅的相对位置,当部分反射镜能够同时给两个光纤激光器提供足够的反馈时,从部分反射镜输出的两个光斑逐渐靠近并最终合成为一个光斑,此时两个光纤激光器以光栅衍射特性确定的频率工作,实现了两路光纤激光器的非相干功率叠加。图 7 给出了实现谱组束时两个光纤激光器各自的光谱以及组束后的谱图,图 7(a)为 6 m 长度光纤的激光谱,峰值波长为 1535.04 nm,最大入纤抽运功率为 2.6 W; (b) 为 8 m 长度光纤的激光谱,峰值波长为 1563.36 nm,最大入纤抽运功率为 4 W; (c) 为组束输出光谱。实现谱组束时,6 m 长度的光纤激光器峰值波长被固定为 1535.04 nm,最大入纤抽运功率为 2.6 W,8 m 长度的光纤激光器峰值波长为 1563.36 nm,最大入纤抽运功率为 4 W,两个光纤激光器的谱峰间隔为 28.32 nm,组束输出总功率为 480 mW。若在很小的范围内调节部分反射镜,两个激光器的工作波长会同时产生移动,但两个谱峰之间的间隔基本保持不变。用刀口法进行过光束质量测量,通过双曲线拟合,组束前单个光纤激光器的  $M^2 = 1.22$ ,而组束后的  $M^2 = 1.31$ ,即组束后光束质量略有降低,这主要是由于光栅色散导致的。

根据 Bochove<sup>[14]</sup> 建立的谱组束理论,各光纤激光器的工作波长间隔为

$$\Delta\lambda = \frac{dL \cos \beta}{f}, \tag{1}$$

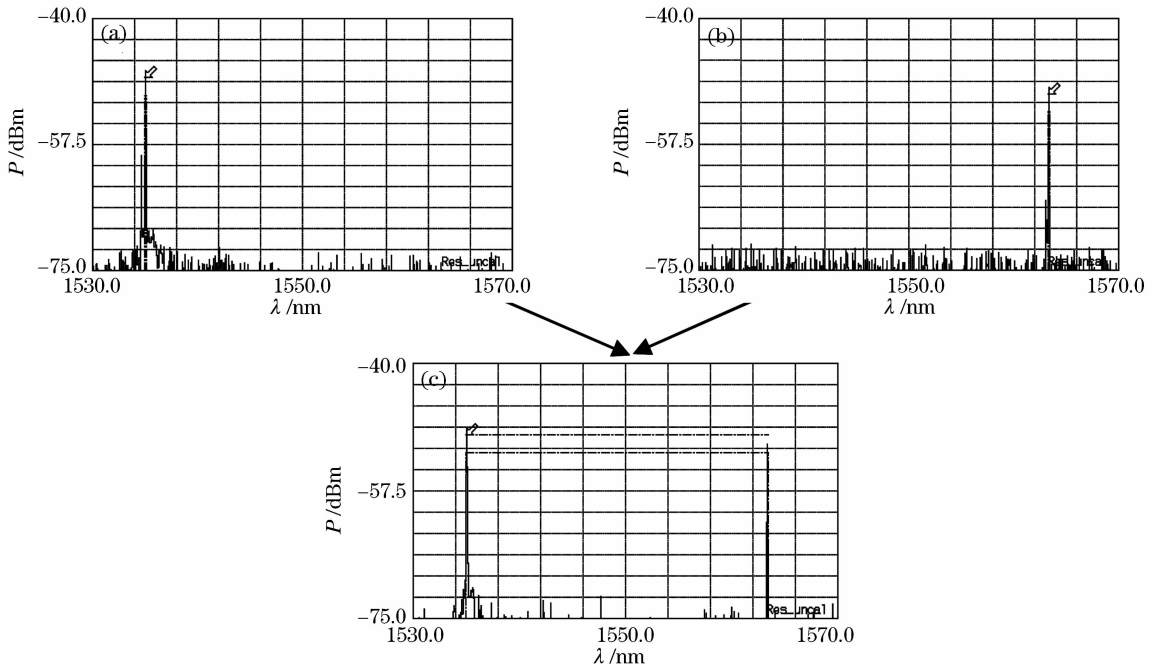


图7 两个光纤激光器同时工作时的输出光谱

Fig. 7 Spectra of the output beam when the two EYDFL operated simultaneously

式中  $d$  为光栅周期,  $L$  为指定光纤激光器偏离系统光轴的横向距离,  $\beta$  为光栅的衍射角,  $f$  为变换透镜焦距。在上面的组束实验中, 两根光纤紧密排列, 其间隔为光纤本身的外包层直径, 即  $L = 453 \mu\text{m}$  (实验中光纤外包层直径均值), 根据实验装置部分给出的其他参数, 可以计算出实现谱组束时两光纤激光器的工作波长间隔约为  $28.022 \text{ nm}$ , 这与图 6 得到的结果一致。

在实验中也考虑过增大变换透镜的焦距以减小两个光纤激光器工作波长的间隔, 但在试用焦距  $f = 50 \text{ mm}$  的变换透镜时发现部分反射镜难以提供足够的反馈使两个光纤激光器形成振荡, 这主要是由以下几个原因造成的: 1) 光纤长度没有优化, 且耦合进入光纤的抽运功率较低, 使光纤激光器的输出功率较低; 2) 光纤输出端没有加入准直器件, 光束自由传播, 在光栅和部分反射镜上的光斑变大, 单位面积上的能量减小; 3) 闪耀光栅的衍射效率和部分反射镜对激光的反射率都较低, 导致反馈回各个光纤的能量不足以形成有效振荡。为了减小光纤激光器的工作波长间隔, 实现更多光纤激光器的谱组束, 目前正考虑在光纤输出端加入微透镜阵列以对各光束进行准直, 同时在系统中采用具有更高衍射效率的光栅, 相关实验结果将在后续报道。

## 5 结 论

利用放置在外腔中的闪耀光栅实现了两个不同长度 EYDF 激光器的谱组束。在  $1532 \sim 1568 \text{ nm}$  范围内实现了 EYDF 激光器的调谐输出, 调谐范围达到  $36 \text{ nm}$ ; 在光纤长度分别为  $6 \text{ m}$  和  $8 \text{ m}$ , 入纤抽运功率分别为  $2.6 \text{ W}$  和  $4 \text{ W}$ , 且闪耀光栅的衍射效率为  $69\%$  时获得了  $480 \text{ mW}$  的谱组束输出。

## 参 考 文 献

- Chu Xingchun, Zhan Shengbao, Zhao Shanghong *et al.*. Research on phase-detecting method for coherent beam combining of fiber laser array [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2008, **29**(2):308~312  
楚兴春, 占生宝, 赵尚弘 等. 光纤激光阵列相干组束中位相检测方法的研究[J]. 半导体光电, 2008, **29**(2):308~312
- He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Phase-locking and high coherent power output of two fiber lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9):1153~1158  
何兵, 楼祺洪, 周军 等. 两个光纤激光器的相位锁定及高相干功率输出[J]. 中国激光, 2006, **33**(9):1153~1158
- Cao Jianqiu, Lu Qisheng, Hou Jing *et al.*. Influence of combining errors in the system for coherent combining of fiber lasers on the far field of output [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3):351~358  
曹涧秋, 陆启生, 侯静 等. 光纤激光器相干合成系统中组束误差对远场光场的影响[J]. 中国激光, 2008, **35**(3):351~358
- Chu Xingchun, Zhao Shanghong, Zhan Shengbao *et al.*. Spectral beam combination of fiber lasers based on cascaded volume gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8):1538~1542  
楚兴春, 赵尚弘, 占生宝 等. 基于级联体光栅的光纤激光阵列

谱组束[J]. 光学学报, 2008, **28**(8):1538~1542

5 T. M. Shay, V. Benham, L. J. Spring. Self-referenced locking of optical coherence by single detector electronic-frequency tagging [C]. *SPIE*, 2006, **6102**:61020V

6 Bing He, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. 113-W in-phase mode output from two ytterbium-doped large-core double-cladding fiber lasers [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7):412~414

7 Chu Xingchun, Zhan Shengbao, Zhao Shanghong *et al.*. Analysis of coherent beam combining through superposed volume gratings by coupled wave theory [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2008, **40**(3):505~509

8 H. L. Thomas, A. Liu, P. R. Hoffman *et al.*. 522 W average power, spectrally beam-combined fiber laser with near-diffraction-limited beam quality [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(4):349~351

9 Chu Xingchun, Zhao Shanghong, Shi Lei *et al.*. Expansion of the channel number in spectral beam combining of fiber lasers array based on cascaded gratings [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(15):4099~4102

10 T. Y. Fan, A. Sanchez. Coherent (phased array) and wavelength (spectral) beam combining compared [C]. *SPIE*, 2005, **5709**:157~164

11 S. Klingebie, F. Röser, B. Ortaç *et al.*. Spectral beam combining of Yb-doped fiber lasers with high efficiency [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(8):1716~1720

12 C. C. Cook, T. Y. Fan. Spectral beam combining of Yb-doped fiber lasers in an external cavity [C]. *OSA TOPS, Advanced Solid-State Lasers*, 1999, **26**:163~166

13 A. Sevian, O. Andrusyak, I. Ciapurin *et al.*. Efficient power scaling of laser radiation by spectral beam combining [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(4):384~386

14 E. J. Bochove. Theory of spectral beam combining of fiber lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2002, **38**(5):432~444

## 《中国激光》“全固态激光技术”专题 征 稿 启 事

全固态激光技术是目前我国在国际上为数不多的从材料源头到激光系统集成拥有整体优势的高技术领域之一,全固态激光器件与材料研究的迅速发展,对激光先进制造技术、激光显示技术和激光医疗等领域的发展产生了巨大的推动作用,已取得大量研究成果。《中国激光》已于2009年7月正刊上出版“全固态激光技术”专集,得到了本领域很多院士和知名专家的大力支持,发表了多篇国内知名课题组的全固态激光技术发展前沿领域的文章,反响非常好。应广大专家、作者和读者的要求,《中国激光》计划于2010年7月继续推出“全固态激光技术”专题栏目,现特向国内外广大读者以及作者征集“全固态激光技术”方面原创性的研究论文和综述,旨在集中反映该方面最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括:

- 连续全固态激光器;
- 脉冲全固态激光器;
- 光纤激光器;
- 其他

截稿日期:2010年4月15日

投稿方式以及格式:可通过中国光学期刊网网上投稿系统直接上传稿件(主题标明“全固态激光技术”投稿),详情请参见 <http://www.opticsjournal.net/zgjj.htm>。本专题投稿文体不限,中英文皆可,其电子版请使用MS-word格式,有任何问题请咨询马沂编辑,E-mail: [CJL@siom.ac.cn](mailto:CJL@siom.ac.cn);电话:021-69918427。

《中国激光》编辑部