

双波长光纤激光器的保偏光纤功率放大特性研究

丁亚茜^{1,2} 漆云凤¹ 刘 源¹ 刘 驰¹ 顾锡嘉³ 周 军¹

¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800
² 中国科学院大学, 北京 100049
³ 瑞尔森大学电气与计算机工程系, 加拿大 M5B2K3

摘要 对功率比可调谐的双波长光纤激光器及其保偏光纤功率放大器特性进行研究。以中心波长分别为 1030 nm 和 1035 nm 的两对光纤光栅作为谐振腔镜, 通过引入 1035 nm 波长激光可调节的腔内损耗, 实现了功率比可调的双波长光纤激光器。以双波长光纤激光器为种子光源, 建立了二级保偏光纤功率放大系统, 通过控制双波长信号的功率比, 研究了种子光特性对双波长功率放大的影响, 获得了功率比可调的 1035 nm 和 1030 nm 双波长激光的放大输出, 在双波长等幅输出情况下, 最高功率达 7.77 W。通过增大抽运功率或增加放大级数, 可以获得更高功率的可调双波长激光输出, 为今后应用于非线性光学差频产生太赫兹波提供了可能。

关键词 光纤激光器; 光纤放大器; 太赫兹; 双波长; 光纤光栅; 缠绕损耗

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.0302002

Study on Polarization Maintaining Fiber Power Amplification Characteristics of Dual-Wavelength Fiber Lasers

Ding Yaqian^{1,2} Qi Yunfeng¹ Liu Yuan¹ Liu Chi¹ Gu Xijia³ Zhou Jun¹

¹ Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Lasers and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³ Department of Electrical and Computer Engineering, Ryerson University, Canada M5B2K3

Abstract The power-ratio-tunable dual-wavelength fiber laser with linearly-polarized output and its polarization maintaining fiber power amplifier are demonstrated. Two pairs of fiber Bragg gratings with polarization-matching techniques are employed as the mirrors of the resonator to insure the linearly-polarized output with central wavelengths of 1035 nm and 1030 nm, respectively. By introducing the cavity loss at 1035 nm, the power ratio of the two wavelengths can be continuously changed. With the dual-wavelength fiber laser as the seed, two-stage polarization maintaining fiber amplifier is established to scale up the output power. By changing the power-ratio of the two wavelengths of the seed, the affection of seed characteristics on the dual-wavelength power amplification is studied to realize the adjustable power-ratio of the amplified output. When the output amplitude of dual-wavelength on the spectrum is tuned to be equal, the maximum output power of 7.77 W is achieved. Future power scaling operation can be achieved by increasing the pump power or adding the amplification stages, which provides the possibility in application to generate terahertz wave by optical nonlinear difference frequency.

Key words fiber lasers; fiber amplifier; terahertz; dual-wavelength; fiber grating; bending loss

OCIS codes 060.2310; 060.2320; 060.2430

收稿日期: 2013-08-19; **收到修改稿日期:** 2013-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(60907045)、上海启明星项目(12QH1401100)、广东省中国科学院全面战略合作项目(2010B090300063)

作者简介: 丁亚茜(1987—), 女, 博士研究生, 主要从事单链路光纤激光放大方面的研究。E-mail: dyaqian@126.com

导师简介: 周 军(1972—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事高功率光纤激光器和准分子激光器等方面的研究。

E-mail: junzhousd@siom.ac.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

1 引 言

近年来,双波长激光器成为国际上较热门的研究课题之一,它可广泛应用于激光光谱学、干涉彩虹全息、激光遥感遥测、差分吸收激光雷达、非线性光学频率变换以及激光医学等领域。且由于太赫兹技术在无损检测、空间探索和科学实验中的应用具有显著优势,使得适用于差频产生太赫兹信号的双波长激光器成为激光科学与工程领域的研究热点之一^[1]。相比于传统的气体激光和固体激光技术,光纤布拉格光栅激光器由于具有输出功率高、光束质量好、转换效率高、阈值低、线宽窄、输出波长多和结构简单等诸多优点,使得利用双波长光纤激光器非线性光学差频产生太赫兹波有着明显的优势,便于实现全光纤化,有利于太赫兹辐射源的小型化和实用化。

利用双波长激光器作为太赫兹辐射源有许多好处,例如可很好地保证其时间和空间的同步特性。为了提高太赫兹抽运源的能量转换效率,要求差频的两束光强度比较一致。但是,普通的掺镱光纤(YDF)激光器因其谱线均匀展宽及交叉增益饱和效应会引起模式之间的竞争,难以实现双波长激光的稳定振荡输出^[2]。由于YDF对不同波长的激光具有不同的增益,在一根增益光纤中难以实现对双波长激光的等强度放大,这成为将主振荡功率放大(MOPA)系统双波长高功率放大应用到太赫兹技术中的一大难题,故迫切需要一个功率比可调谐的双波长激光器^[3]。

另一方面,功率比可调谐的双波长光纤激光器由于有效地解决了固定波长激光器存在的不足,减少了系统中光源的备用数量和规格,使发射端的设计更为紧凑、经济,所以对可调谐双波长光纤激光的研究具有重要的意义^[4]。

本文对功率比可调谐的双波长保偏光纤级联放大器进行了研究。在主振荡器中采用保偏光纤上刻制光纤光栅进行选频,再引入缠绕损耗,使得其中波长1035 nm的激光腔损可调节,通过损耗控制实现激光器可在不同的单波长下输出或双波长同时输出两种运转状态之间切换,从而获得功率比可调谐的双波长激光作为种子源。且由于MOPA技术的光纤放大器,能够分别优化种子源和光纤功率放大器,还能很好地保持种子光的光束质量和激光特性,得到高功率的激光输出,故采用了后续的保偏光纤级联放大系统,实现输出1035 nm和1030 nm的双波长激光且功率比可调谐。在单波长1.03 μm 输出

时,其功率可达7.86 W,因其波长在硅探测器中响应系数高,故在激光雷达探测方面具有广阔的应用前景。而在双波长等幅输出情况下,最高功率达7.77 W,该放大器可用于更高功率的级联光纤放大系统,为今后应用于非线性光学差频方法获得太赫兹波提供了可能。

2 实验装置

如图1所示,主振荡器是由两对光纤布拉格光栅(FBG)和2.5 m长的YDF构成,使用波分复用器(WDM)结构由单管激光二极管(LD)抽运。FBG1的起振波长在1035 nm,高反端(HR)的反射率 $R=99\%$,耦合器(OC)FBG的反射率 $R=9.5\%$ 。FBG2的起振波长在1030 nm,HR-FBG1的反射率 $R=99\%$,OC-FBG2的反射率 $R=8.5\%$ 。而双波长激光器存在的主要问题之一是两个振荡波长难以同时起振输出,因为振荡器中两个波长的振荡激光共同使用谐振腔中的反转粒子,必然存在均匀谱线展宽引起的模式竞争问题,使得YDF激光器很难获得稳定的双波长输出。如果不对主振荡器采取一定的手段,激光器只能输出波长为1035 nm的激光,不能实现双波长运转。为了使主振荡激光器实现单双波长输出可控、双波长输出功率比可调谐的输出,对1035 nm腔引入了缠绕损耗,即在图1中两高反光栅处之间的单模光纤进行缠绕。单模光纤由张小康^[5]等给出的计算公式可见,弯曲损耗与光纤的缠绕半径呈反比例关系。实验中,在光纤光栅刻制时,1030 nm光纤光栅高反端和1035 nm光纤光栅高反端中间有几厘米的空隙,并对这段单模光纤进行缠绕。为此,设计了图2中缠绕装置,将这段单模光纤缠绕于中间的立柱上,立柱的直径 $D=6\text{ mm}$ 。两边的光纤固定于两个金属臂上,通过调节两臂之间开合的角度从而调整光纤的缠绕半径和长度,对1035 nm波长的激光器腔损引入缠绕损耗。这使得1035 nm波长激光器的腔损可调谐,同时使1030 nm波长激光器的腔损恒定不变,从而达到单双波长可控及双波长输出时功率比可调节的目的。

由于主振荡器输出功率较弱,故为了得到功率合适的双波长激光器采用了两级级联功率放大结构。由于 Yb^{3+} 在1030 nm处光谱的发射截面很宽且较平缓,在 $\lambda_1=1035\text{ nm}$ 和 $\lambda_2=1030\text{ nm}$ 处YDF的发射截面几乎没有变化,理论上可以保证YDF可实现几十纳米宽的波长放大^[6]。在两级级联放大

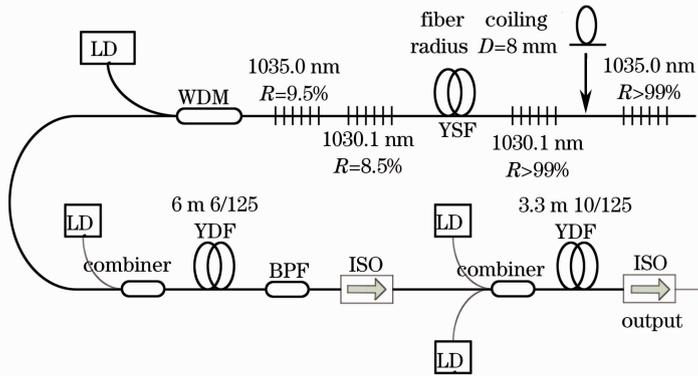


图 1 功率比可调谐的双波长保偏光纤放大器结构示意图

Fig. 1 Experimental setup of power-ratio tunable dual-wavelength fiber power amplifier

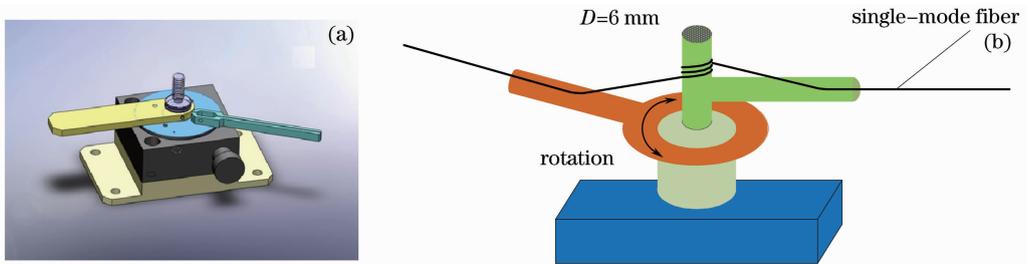


图 2 用以调整光纤的缠绕半径和长度的光纤缠绕装置。(a) 机械图；(b) 示意图

Fig. 2 Coiling fiber unit applied to modulating coiling radius and length on single-mode fiber.

(a) Mechanical drawing; (b) sketch map

中,预放级增益光纤采用掺镱单包层光纤(YSF),预放抽运源均为 976 nm 单 LD,通过 WDM 耦合到 YSF 中。在光纤预放大中,采用 6 m 保偏掺镱双包层光纤(纤芯为 $5 \mu\text{m}$,数值孔径 $NA=0.12$;内包层为 $130 \mu\text{m}$, $NA=0.46$)为放大介质,抽运源为中心波长为 975 nm、功率为 2.5 W 的尾纤输出,通过 $(2+1) \times 1$ 的保偏光纤耦合器将种子光和抽运光耦合到放大光纤中。预放级加入带通滤波器(BPF)用来滤除放大过程中产生的放大自发辐射(ASE)噪声,并加入隔离器(ISO)以避免后向散射光的干扰。在主放大模块中,采用 $(2+1) \times 1$ 保偏光纤耦合器用于耦合两个波长在 976 nm 附近功率为 10 W 的 LD 组成的抽运光源和预放大器的放大信号光。放大器中的增益光纤为长度为 3.5 m 的保偏掺镱双包层光纤(纤芯为 $10 \mu\text{m}$, $NA=0.075$;内包层为 $125 \mu\text{m}$, $NA=0.46$)。在主放增益光纤之后熔接保偏 ISO 输出,且熔点之后做抽运滤除。在光纤放大模块中所有的光学器件均通过光纤熔接而成,构成稳定性小型化模块。所有光学元件均通过光纤熔接技术连接,实现了光路的全光纤化。

3 实验结果

3.1 双波长光纤激光器的输出结果

即使 Yb^{3+} 在 1030 nm 处光谱的发射截面很宽且平缓,在 $\lambda_1=1035 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2=1030 \text{ nm}$ 处 YDF 的发射截面几乎没有变化,但双波长功率放大系统的主要问题是增益光纤对各个波长的放大增益不同,YDF 在不同的点如 $\lambda_1=1035 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2=1030 \text{ nm}$ 处吸收差别很大。对放大器注入等强度的双波长激光,经预放级放大后两个波长的强度相差较大。故为了得到对双波长强度一致的放大,这样一个双波长功率比可任意调节的双波长光纤激光器是十分必要的^[7]。

通过调节单模光纤的弯曲程度引入弯曲损耗,从而使得 1035 nm 波长激光的腔内损耗可调节,实现一个双波长强度可任意调节的双波长光纤激光器,典型的几种输出光谱如图 3 所示,在未加缠绕损耗时,激光器输出 1035 nm 单波长,图 3(a)为随着缠绕程度的加深,激光器开始出现微弱的 1030 nm 激光;图 3(b)所示为经仔细调节,可使得 1030 nm 和 1035 nm 等幅度输出;再加深缠绕程度,可使 1030 nm 激光强度强于 1035 nm[图 3(c)];最后激光器可完全实现 1030 nm 单波长运转[图 3(d)]。

因此说此激光器可实现 1035 nm 单波长输出或 1030 nm 单波长输出或双波长同时输出,且双波长

的输出功率比可调谐。

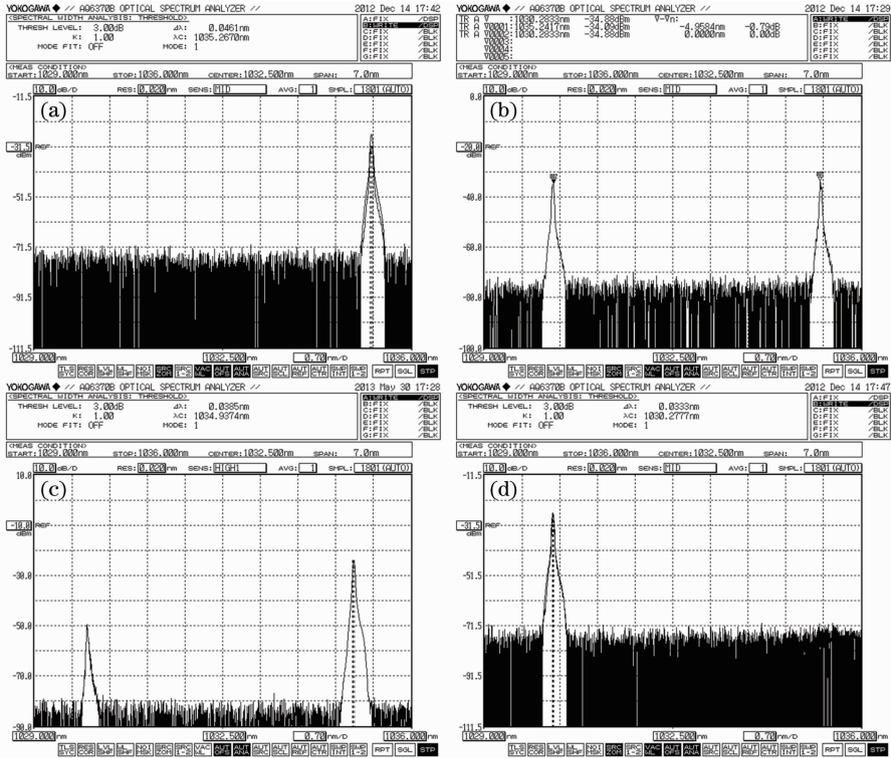


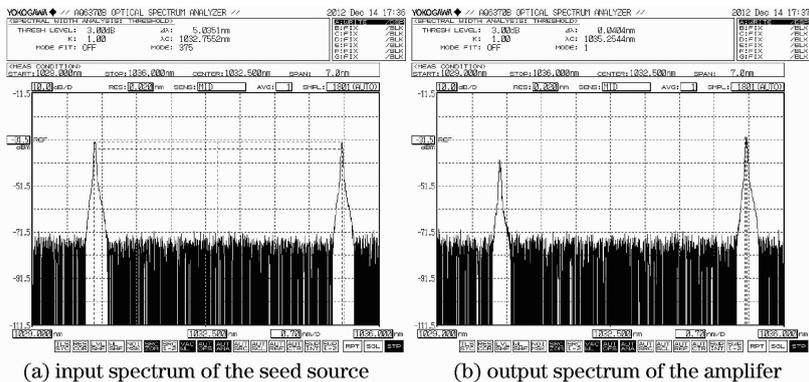
图 3 调谐光纤缠绕装置激光器的输出强度变化谱图

Fig. 3 Output spectra of the proposed laser with various power ratios while modulating the coiling fiber unit

3.2 预放级双波长保偏功率放大器的输出结果

为细致研究双波长放大器放大特性,选择预放级放大为主要研究对象。当输入的种子光为单波长 1035 nm 或 1030 nm 输入,放大后光谱信噪比高于 40 dB,且未观察到受激布里渊散射与受激拉曼散射等非线性现象。当种子光为 1030 nm 和 1035 nm

激光等幅输入时[图 4(a)],经放大后两波长功率差别较大,在 1035 nm 处的强度比为 1030 nm 处的强度高出 10 dB 以上[图 4(b)]。这是由于 YDF 对不同波长的激光具有不同的增益,故即使主振荡器输入的种子光其双波长强度一致,经放大后强度也会有差别。



(a) input spectrum of the seed source

(b) output spectrum of the amplifier

图 4 种子光为双波长等幅输入时预放级放大后的光谱

Fig. 4 Output spectra of the amplifier while the seed source is tuned to equal amplitude dual-wavelength output

为此,用 ASE 宽谱发射源对预放级 YDF 在这两波长处的吸收系数进行了测量。图 5 中黄线为 ASE 源的发射光谱,而红线为 ASE 源经 1 m 的 YDF 吸收后的光谱,其中图 5(a)为宽谱结构,图 5

(b)为光谱的精细结构。由图 5(b)可见,1 m YDF 在 1030 nm 处的吸收比在 1035 nm 处的吸收高出约 2 dB,可以估算预放级经 6 m 增益光纤,其吸收系数之差约为 12 dB。

通过对主振荡器中光纤缠绕装置进行调节成功地入射的种子光中双波长强度进行调节,从而使得放大后输出光中双波长功率有任意比例,得到和图 3 类似的结果。由于没有将 1035 nm 和 1030 nm

波长如此相近的两束光分开的滤波片,实验中通过观测光谱仪中的光强度大致判断光功率比的变化情况。表 1 是实验测得的不同种子光输入强度的情况下,对应的预放级放大输出强度。

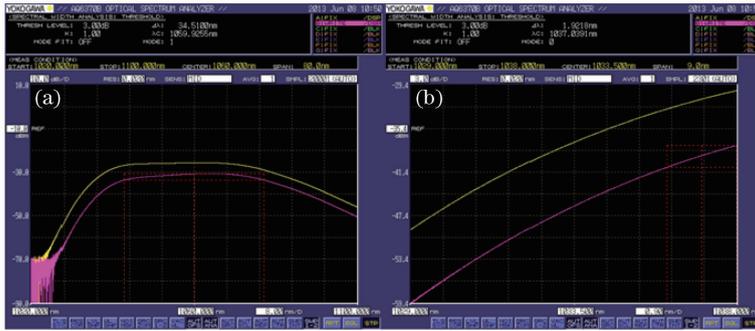


图 5 预放级增益光纤对 ASE 宽谱发射源的吸收情况

Fig. 5 Absorption spectra of the first-stage amplifier gain fiber with ASE emission source

表 1 不同种子光输入强度下对应的预放级放大输出强度

Table 1 Intensity ratio of dual-wavelength in amplifier versus different intensity ratios of dual-wavelength in seed source

	In seed source	In amplifier
Intensity ratio of 1035/1030 nm /dB	41/0	41/0
	42/30	55/30
	40/40	40/30
	30/41	41/41
	0/41	0/41

为使得此级联放大器对双波长放大后的强度基本一致,需对入射的种子光强度进行调节。当种子光为 1030 nm 处的强度比 1035 nm 处的强度高出 11 dB 时,经放大后输出光中双波长强度接近一致,这与之前的分析也较一致。

3.3 主放级放大

同理,对主振荡器中光纤缠绕装置进行调节,从

而使得预放级输出光双波长功率可调,进一步使得主放级输出光双波长功率可调,主放级输出双波长功率也可调谐至图 3 中的各种比例。

图 6(a)为不同波长下预放级激光输出功率随抽运功率的变化关系,图 6(b)为不同波长下主放级激光输出功率随抽运功率的变化关系,可见波长对放大级激光输出功率没有太大影响。主放级输出功率受限于抽运功率,未达到饱和。后续实验中可加大抽运功率,或增加放大级数以获得更高功率^[8]。主放输出光谱如图 7 所示,由于一级放大光纤在 1.03 μm 处有 ASE 效应,故在一级放大输出前选用了带通滤波器。光谱中 1035 nm 旁有一小尖峰即 ASE 基底经带通滤波器滤除后的形状,但它与信号光峰值强度相差约 40 dB,故不影响实验结果。实验过程中未观察到受激布里渊散射与受激拉曼散射等非线性现象。输出的偏振消光比达 38 dB,输出光纤芯径为 10 μm,其输出的光束质量接近单模输出。

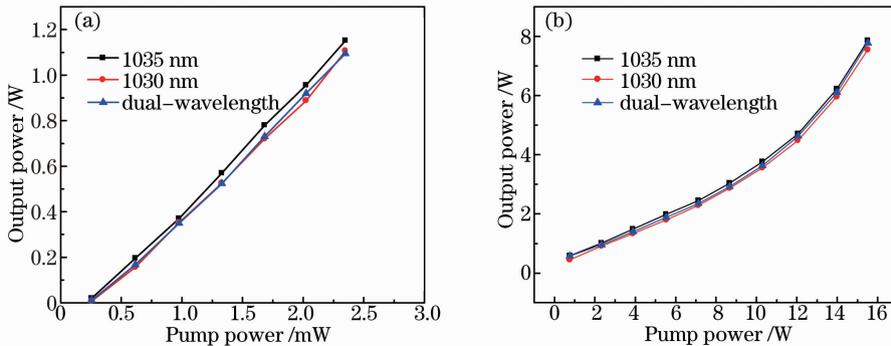


图 6 不同波长下,(a)预放级和(b)主放级激光输出功率随抽运功率的变化关系

Fig. 6 Output power versus pump power in the (a) first-stage amplifier and (b) second-stage amplifier with different wavelengths

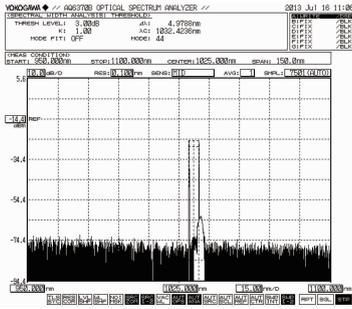


图 7 主放大级放大后的双波长等幅输出

Fig. 7 Output spectrum of the second-amplifier while the first amplifier is tuned to equal amplitude dual-wavelength output

4 结 论

利用增益平衡的方法,通过调整光纤的缠绕半径和长度、引入缠绕损耗,使得其中波长为 1035 nm 的激光器腔损可调,从而实现激光器可在不同的单波长下输出或双波长同时输出两种运转状态之间切换,获得功率比可调谐的双波长激光作为级联放大系统的种子源。它克服了 MOPA 系统中双波长增益不均衡的缺点,实现了级联放大双波长功率比可控输出的目的,在双波长等幅输出情况下,最高功率达 7.86 W,偏振消光比为 38 dB,最高功率受限于抽运功率。在后续实验中可利用本实验的原理和装置,在双波长激光器输出双波长功率比可调的情况下,进行多级 MOPA,得到双波长功率较一致的高功率激光,从而应用到基于光学差频产生太赫兹波输出。

参 考 文 献

- Zhang Qiang, Yao Jianquan, Wen Wuqi, *et al.*. High power laser diode pumped Nd:YAG continuous wave dual-wavelength laser[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(5): 577-581.
- 张强,姚建铨,温武麒,等.高功率激光二极管抽运 Nd:YAG 连续双波长激光[J].中国激光,2006,33(5):577-581.
- Liu Yun, Xing Junhong, Jiao Mingxing, *et al.*. Design and experimental study of two-wavelength erbium-doped fiber laser using a pair of fiber Bragg gratings [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2012, 28(3): 303-307.
- 刘芸,邢俊红,焦明星,等.双 FBG 双波长掺铒光纤激光器设计与实验研究[J].西安理工大学学报,2012,28(3):303-307.
- Xu Pan, Hu Zhengliang, Ma Lina, *et al.*. Output power stability of dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(6): 1347-1351.
- 徐攀,胡正良,马丽娜,等.双波长环形掺铒光纤激光器输出的稳定性[J].中国激光,2009,36(6):1347-1351.
- Chai Hongliang. All Solid State Dual-Wavelength and Multi-Wavelength Laser[D]. Shandong: Shandong Normal University, 2007. 8-9.
- 柴洪亮.全固态双波长及多波长激光器[D].山东:山东师范大学,2007.8-9.
- Zhang Xiaokang, Liao Changjun, Liu Songhao. The relationship of the radius to the loss in bending waveguide[J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(2): 147-150.
- 张小康,廖常俊,刘颂豪.波导弯曲半径与弯曲损耗的关系[J].光子学报,2004,33(2):147-150.
- Bai Yangbo, Xiang Wanghua, Zu Peng, *et al.*. Tunable two wavelengths linear-cavity Yb-doped fiber laser based on volume grating[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1102004.
- 白扬博,向望华,祖鹏,等.基于体光栅的可调谐线型腔双波长掺镱光纤激光器[J].中国激光,2011,38(11):1102004.
- Li Zhen, Zhou Jun, He Bing, *et al.*. Controllable dual-wavelength fiber laser[J]. Chin Phy Lett, 2012, 29(7): 074203.
- Chi Liu, Qi Yunfeng, Ding Yaqian, *et al.*. All-fiber, high power single-frequency, linearly polarized ytterbium-doped fiber amplifier[J]. Chin Opt Lett, 2011, 9(3): 031402.

栏目编辑:宋梅梅