

文章编号: 1006-4710(2012)03-0303-05

双 FBG 双波长掺铒光纤激光器设计与实验研究

刘芸, 邢俊红, 焦明星, 王佳翼

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 波长可调谐的双波长光纤激光器由于带宽较宽、线宽窄,与光纤元件天然兼容等特点,可作为 DWDM 光纤通信及光纤传感系统的理想光源。设计并实验研究了一种双波长环形腔掺铒光纤激光器,该激光器采用两根 FBG 和一个 3dB 耦合器构成可调谐 Y 型光滤波器,并通过对 FBG 施加轴向应力改变布拉格中心波长,从而获得波长可调谐的双波长激光输出。实验结果表明:当轴向负载在 0~100 N 范围内变化时,双波长光纤激光器的波长差在 0.638~1.616 nm 范围内线性调谐,调谐灵敏度为 0.009 6 nm/N。利用增益均衡方法独立调节激光腔内的增益和损耗,光纤激光器可在单波长和双波长两种运转状态之间切换。

关键词: 双波长掺铒光纤激光器; 光纤 Bragg 光栅(FBG); 波长调谐; 增益均衡

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A

Design and Experimental Study of Two-Wavelength Erbium-Doped Fiber Laser Using a Pair of Fiber Bragg Gratings

LIU Yun, XING Junhong, JIAO Mingxing, WANG Jiayi

(Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The tunable two-wavelength fiber laser can be used as an ideal source for DWDM fiber communication and fiber sensor, because of its advantages such as wider bandwidth, narrower line-width and natural compatibility with fiber. A two-wavelength erbium-doped fiber ring laser has been designed and investigated experimentally, in which a tunable Y-type optical filter constructed with a pair of fiber Bragg gratings (FBGs) and a 3dB coupler have been used, and both FBGs are axially applied to different stresses to change both Bragg wavelengths so that a tunable two-wavelength laser output can be obtained. The experimentally obtained results have shown that the wavelength difference of the two-wavelength fiber laser is linearly tunable in a range from 0.638 nm to 1.616 nm when the axial load varies from zero to 100 N, corresponding to a tuning sensitivity of 0.009 6 nm/N approximately. The fiber laser can be switchable between one-and two-wavelength operations by adjusting the intra-cavity gains and losses via using the gain equalization method independently.

Key words: two-wavelength erbium-doped fiber laser; FBG; wavelength tuning; gain equalization

双波长激光可应用于激光遥感遥测、激光显示、激光光谱学以及激光医学等领域。波长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,使系统的运营成本和维护费用大幅度降低,在波分复用、时分复用光纤通信网、光纤传感系统和现代光

收稿日期: 2012-05-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175421,61205135);陕西省科技计划基金资助项目(2011K09-14);陕西省教育厅产业化培育项目(2010JC12);陕西省教育厅科学研究计划项目(2010JK726,2010JK696);校青年科学研究计划项目(102-211014,102-211113)。

作者简介: 刘芸(1980-),女,黑龙江海伦人,讲师,主要研究方向为激光技术和光纤传感技术。

E-mail: lyun@xaut.edu.cn。

谱技术领域具有重要的应用价值。

近年来有关可调谐掺铒光纤激光技术的研究,主要是围绕调谐技术及如何实现稳定的多波长激光运转等关键技术方面展开的。报道的可调谐激光器的滤波元件有 F-P 滤波器^[1-2]、声光滤波器^[3]、介质薄膜干涉滤波器^[4]、光纤光栅^[5-9]等。其中光纤布拉格光栅(FBG)具有很好的波长选择性、光纤兼容性、调谐简便等优点,被广泛作为滤波选择元件应用于光纤激光器中实现波长调谐,克服了非光纤调谐器件与光纤耦合时效率低的缺点,大大降低了激光阈值。另外,普通的掺铒光纤激光器由于谱线均匀展宽及交叉增益饱和效应引起了模式之间的竞争,限制了室温下多波长激光的稳定振荡输出。因此,利用频移反馈^[10]、四波混频^[11]、偏振烧孔^[12-13]、增益均衡^[7-9,14-15]等方式抑制模式竞争的问题也成为掺铒光纤激光器的一个研究热点。增益均衡方法,就是通过调节腔内的增益和损耗来抑制模式竞争,与其它方法相比,这种方法无需给系统引入频移元件及复杂的非线性效应、偏振烧孔等机制,便可在普通掺铒光纤激光器中室温输出稳定的激光。Talaverano L 等^[7]及 Liaw S K 等^[8]通过调节各波长通道损耗的办法,实现稳定的波长输出,但波长不可调谐;Y. Liu 等^[14]通过控制腔内总损耗实现了 2 波长及 3 波长输出,输出波长不可调谐,并且无法独立控制各波长损耗。徐攀等^[9]通过电可变光衰减器使环形腔激光器同时输出双波长,但仅一路激光波长可调;白扬博^[15]等在掺铒光纤激光器中通过体光栅控制支路损耗方法,实现了 65 nm 双波长调谐,但体光栅角度调节结构复杂,并且调谐波段在 1 013 ~ 1 078 nm 范围,不适用作光纤通信光源。

本文研究的双 FBG 双波长环形腔掺铒光纤激光器在 Y 型可调谐滤波器的两个回路中各放置一个可变光衰减器(VOA),通过增益均衡方法分别实现对两个波长的单独调节,使激光器在不同的单波长输出或双波长同时输出两种运转状态之间切换。利用 FBG 布拉格中心波长对轴向应力敏感的特性,实现双波长同时调谐,实验获得了双波长激光输出的调谐规律:当负载在 0 ~ 100 N 范围内变化时,双波长间隔在 0.638 ~ 1.616 nm 内连续调谐。这种可调谐双波长激光器结构简单、成本低廉,输出双波长激光可作为 DWDM 光纤通信及光纤传感系统的理想光源。

1 实验装置及原理

1.1 实验装置

激光器由 980 nm 半导体激光器(LD)、波分复

用器(WDM)、掺铒光纤(EDF)、耦合器(Coupler)、环行器(OC)、3dB 耦合器、FBG、VOA 及光隔离器(ISO)组成,如图 1 所示。

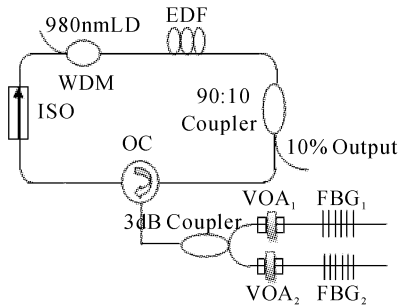


图 1 双 FBG 双波长掺铒光纤激光器系统简图
Fig. 1 Schematic diagram of two-wavelength erbium-doped fiber laser using a pair of FBGs

激光增益介质采用掺杂浓度为 $5.4 \times 10^{24}/\text{m}^3$ 、长度约为 10 m 的 EDF,经过 980 nm/1 550 nm WDM,传输到耦合比为 90 : 10 的 Coupler 后分为两路,其中 10% 一路提供激光输出,90% 一路提供光反馈,反馈光通过 OC 进入 Y 型滤波器进行波长选择。FBG 的作用是选择激光器的激振波长,同时其窄带滤波作用可以限制其它波长的振荡,只有符合 FBG 中心波长的光波经过 OC 回到环路,通过 ISO 进入 WDM,完成一次循环。ISO 不仅确保光波单向传播,而且置于 WDM 前也对多波长稳定输出起到了重要作用^[14]。当系统满足粒子数反转且受激发射大于受激吸收时,信号光将被放大,经过多次传播循环放大,产生双波长激光振荡输出。整个过程用分辨率为 0.015 nm 的光谱分析仪进行观测。

应力调谐中,根据 FBG 对轴向应力敏感的特性,常将 FBG 粘贴在弹性较好的衬底材料上,通过对弹性材料施加外力,使二者一起发生变形,调谐 FBG 中心波长。本文的双波长调谐是由两根 FBG 和一个 3dB 耦合器构成的 Y 型滤波器实现的,实验在一定预紧力条件下,FBG₁ 和 FBG₂ 沿中轴线分别对称粘贴在等腰三角形悬臂梁上、下表面,尽量确保与其刚性连接。当悬臂梁受拉力作用时,FBG₁ 拉伸,增加了光栅周期,中心波长向长波方向移动;同时 FBG₂ 压缩,减小了光栅周期,中心波长向短波方向移动,两波长之间的波长差增加,调谐范围增大。

1.2 实验原理

多波长激光器存在的主要问题之一是各个振荡波长要同时起振输出,因为 Y 型滤波器两个回路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,使得掺铒光纤

激光器很难获得稳定的双波长输出。徐攀等利用 Giles 模型对双波长环形腔掺铒光纤激光器进行了建模,当两个模式各自的增益和损耗相等时,推导出了双波长平衡振荡时损耗满足的方程^[9]:

$$l_2 = l_1 \frac{\alpha_2 + g_2}{\alpha_1 + g_1} + (10 \lg e) \frac{\alpha_2 + g_2}{\alpha_1 + g_1} \alpha_1 L - (10 \lg e) \alpha_2 L \quad (1)$$

式中, l_k 、 α_k 、 g_k 和 L 分别为波长损耗、吸收系数、增益系数和铒纤长度,其中 $k=1, 2$ 。对于已知参数的掺铒光纤激光器,当确定一个振荡波长的损耗时,另一个振荡波长的损耗也就唯一确定下来,满足公式(1)的条件,双波长就可实现同时输出。由于铒纤的增益曲线不平坦,使得每个波长的起振阈值不同,所以应该对每个波长通道独立地调节损耗,保证该激光器同时输出双波长。

图 1 中,双 FBG 构成的两个回路共用同一段掺铒光纤作为增益介质。利用增益均衡的方法,在两个回路中各放置一个轴向位移型 VOA,可调谐衰减量范围为 0 ~ 25 dB,通过改变光纤间的对中精度,调节各自回路的光衰减量,激光器输出不同的单波长或同时振荡输出双波长。当两个模式对应的增益

粒子数几乎相同时,两个模式会同时稳定振荡,输出功率相等的双波长激光;当一个模式对应的增益粒子数远远大于另一个模式的粒子数时,就会在相应波长处形成稳定的单波长振荡,使激光的输出具有波长开关特性。

2 实验结果及分析

2.1 激光器输出

在环形腔双波长掺铒光纤激光器系统中,当 LD 泵浦功率大于阈值功率(7.82 mW)时,光纤激光器输出激光。调节两个回路中 VOA 状态,改变光路的增益和损耗,两功率是此消彼长的关系,可使系统输出任意一个单波长或同时振荡输出双波长。没有加载条件下,实验用光谱分析仪观察到这种波长可开关现象,图 2 即为不同 VOA 状态下光纤激光器的振荡模谱。其中,图 2(a)为双波长同时振荡输出模谱,两个波长分别对应 FBG₁ 和 FBG₂ 中心波长,即 1 551.376 nm 和 1 550.738 nm,波长差为 0.638 nm,3dB 带宽分别为 0.145 nm 和 0.146 nm。图 2(b)为激光器输出其中一个单波长的模谱图,图中输出波长为 FBG₁ 中心波长(1 551.376 nm)。

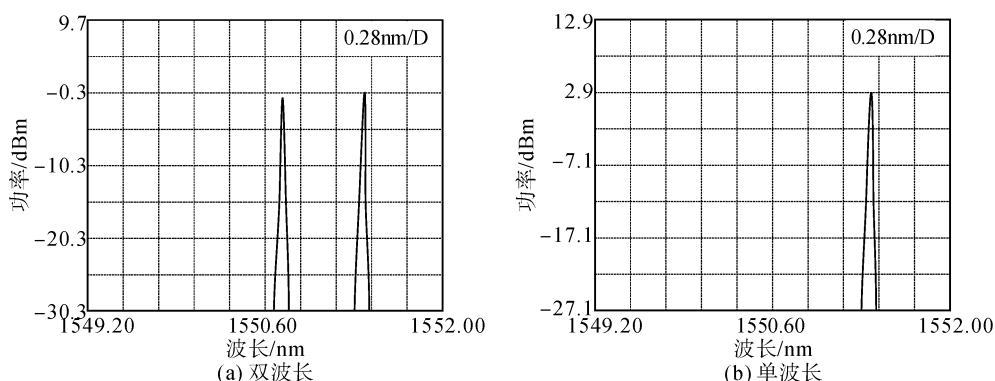


图 2 不同 VOA 状态下光纤激光器振荡模谱

Fig. 2 Oscillating mode spectra of fiber laser in different VOA adjustment condition of two-wavelength and one-wavelength

2.2 双波长调谐

由图 1 可知,两根 FBG 既作为波长选择元件,同时又作为波长调谐元件。当悬臂梁受到轴向负载作用时,两根 FBG 中心波长将发生线性变化,波长差也会随着负载增加而线性增大。实验中,在每个加载条件下,微调两路 VOA 状态,使两束激光的输出功率近乎相等,这就减小了掺铒光纤增益均匀展宽特性引起的模式竞争,确保光纤激光器输出稳定的双波长激光。在保持 LD 泵浦功率为 180 mW 不变的条件下,实验观察到双波长光纤激光器振荡波长及其波长差随 FBG 不同负载作用下的调谐现象。图 3 所示即为负载在 10 N、50 N 和 100 N 时获得的

双波长振荡模谱,两个振荡波长随着负载增加而向相反方向漂移,波长差逐渐增加,两个谱线输出功率近乎相等,说明设计的双波长掺铒光纤激光器实现了波长调谐。

激光器双波长波长差随负载实验变化规律如图 4 所示,图中给出两组实验数据的拟合结果。可以看出,激光器的波长差与负载是成线性依赖关系的,当 FBG 所加负载在 0 ~ 100 N 测量范围内变化时,光纤激光器输出双波长的波长差在 0.638 ~ 1.616 nm 范围内线性调谐,调谐灵敏度为 0.009 6 nm/N。这种 Y 型滤波器并行连接双 FBG 方式,可以有效消除环境温度对波长差的影响,解决 FBG 交叉敏感问题。

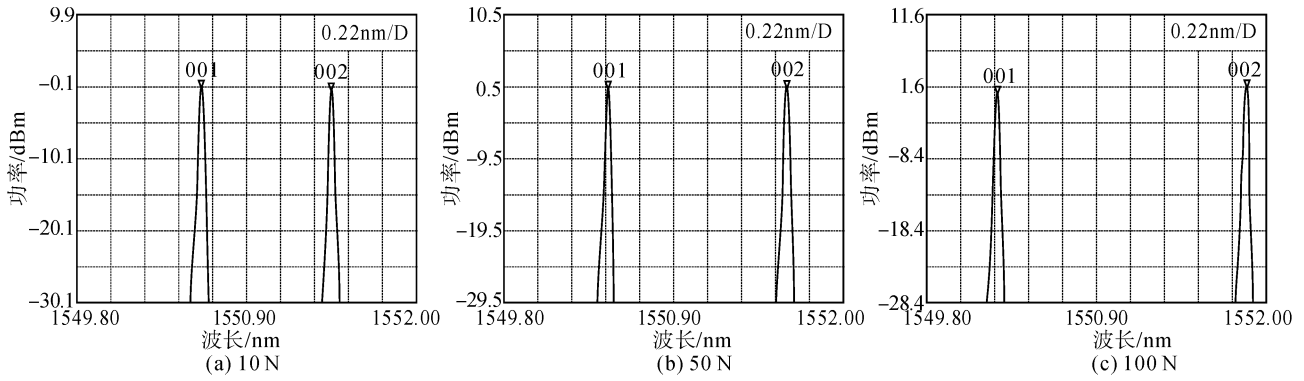


图 3 不同负载作用下双波长光纤激光器振荡模谱

Fig. 3 Oscillating mode spectra of two-wavelength fiber laser applied by different loads of 10 N, 50 N and 100 N

图 5 为负载 10 N 条件下,实验获得的双波长激光连续 16 次重复扫描的模谱图。可以看出,在整个扫描时间内,输出谱线光滑,没有旁瓣,双波长激光

运转稳定,两个输出谱线幅度及波长没有明显变化。利用 VOA 改变光路增益和损耗的方法,方便地实现了室温下双波长激光稳定振荡输出。

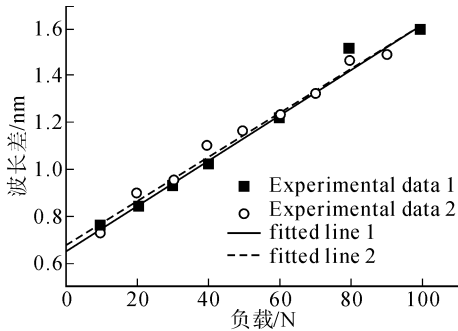


图 4 双波长光纤激光器波长差与负载之间实验关系

Fig. 4 Experimental dependence of wavelength difference of two-wavelength fiber laser on loads

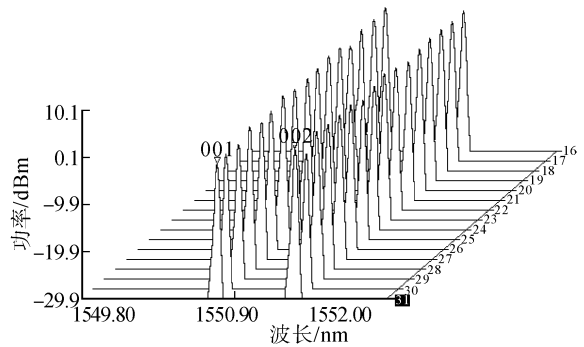


图 5 负载为 10 N 时 16 次重复扫描的双波长激光振荡模谱

Fig. 5 Oscillating mode spectra of two-wavelength laser applied by a load of 10N at sixteen times repeat scan

2.3 双波长输出总功率

整个实验的前提条件是光栅与悬臂梁完全刚性粘结,当悬臂梁受到不同负载作用时,两者会发生相同的形变。实际上,实验由于掺锗石英光纤、45 号钢悬臂梁和环氧树脂粘结剂的杨氏模量不同(分别为 72 GPa、210 GPa 和 3 GPa)所以在调谐过程中导致两个 FBG 应力分布不均匀,产生啁啾,并且梁变形较大时,啁啾就会越明显,导致 FBG 反射率下降,带宽变宽,输出功率减小,实验结果也验证了这一点,如图 6 所示,其中实心数据和空心数据分别代表两次加载过程中负载对应的系统双波长输出总功率。可以看出,实验获得的双波长输出总功率随着负载的增加而逐渐减小,最大减小到平均输出功率的 1.7%,出现了啁啾现象。因此,实验要尽量选则接近光纤杨氏模量的弹性梁及粘结剂,以改善光栅啁啾,提高系统灵敏度。

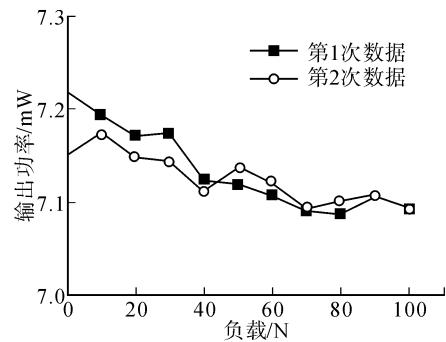


图 6 双波长光纤激光器输出总功率与负载之间实验关系

Fig. 6 Experimental dependence of total output power of two-wavelength fiber laser on loads

3 结论

本实验利用增益均衡方法,通过两个 VOA 对双波长单独调节,在环形腔掺铒光纤激光器中实现了单波长输出或双波长同时输出两种工作模式。采用两根 FBG 和一个 3dB 耦合器构成的 Y 型滤波器作为可调谐滤波器,当负载在 0 ~ 100 N 范围内变化

时,双波长的波长差在 0.638 ~ 1.616 nm 范围内线性调谐,调谐灵敏度为 0.009 6 nm/N,实现了可调谐双波长激光输出。双 FBG 双波长掺铒光纤激光器可以有效消除环境温度对波长差的影响,解决了 FBG 交叉敏感问题,有利于提高灵敏度,并且系统结构简单,调谐方便,在波分复用通信系统及光纤传感方面具有广阔应用前景。

参考文献:

- [1] 张艳,陈伟,任民,等. 稳定可调谐的单纵模多环形腔掺铒光纤激光器[J]. 光学学报,2008,28(3):507-511.
Zhang Yan, Chen Wei, Ren Min, et al. Stable, tunable single-longitudinal-mode erbium-doped fiber laser with multiple ring cavities [J]. Acta Optica Sinica,2008,28(3):507-511.
- [2] 李智勇,刘俭辉,葛春风,等. 基于 F-P 干涉技术的通信波段可调谐激光器[J]. 激光与红外,2004,34(4):266-268.
Li Zhiyong, Liu Jianhui, Ge Chunfeng, et al. Tunable fiber laser based on Fabry-Perot filtering for optical fiber communication [J]. Laser & Infrared, 2004, 34(4):266-268.
- [3] 郭巍,刘迎,肖立峰,等. 基于新型两级集成光学声光可调谐滤波器的环形腔掺铒光纤激光器[J]. 中国激光,2006,33(7):877-881.
Guo Wei, Liu Ying, Xiao Lifeng, et al. Study on characteristics of acoustooptical tunable erbium-doped fiber ring laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(7):877-881.
- [4] 张健生,郭玉彬,王天枢. 可编程控制波长调谐的环形掺铒光纤激光器[J]. 半导体光电,2004,25(5):366-369.
Zhang Jiansheng, Guo Yubing, Wang Tianshu. Programmable wavelength tunable erbium-doped fiber ring laser [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2004, 25(5):366-369.
- [5] 李坚,刘鹏,王静,等. 以环形器和光纤光栅为腔镜的可调谐窄线宽激光器[J]. 中国激光,2009,36(5):1047-1050.
Li Jian, Liu Peng, Wang Jing, et al. Experiment study on a tunable fiber laser using optical circulator and tunable fiber Bragg grating [J]. Chinese Journal of Lasers,2009,36(5):1047-1050.
- [6] He Xiaoying, Wang D N, Liao C R, et al. Tunable and switchable dual-wavelength single-longitudinal-mode erbium-doped fiber laser[J]. Journal of Lightwave Technology,2011,29(6):842-849.
- [7] Talaverano L, Abad S, Jarabo S, et al. Multiwavelength fiber laser sources with Bragg-grating sensor multiplexing capability [J]. Journal of Lightwave Technology, 2001, 19(4):553-558.
- [8] Liaw S K, Jang W Y, Wang C J, et al. Pump efficiency improvement of a C-band tunable fiber laser using optical circulator and tunable fiber gratings [J]. Applied Optics, 2007,46(12):2280-2285.
- [9] 徐攀,胡正良,马丽娜,等. 双波长环形腔掺铒光纤激光器输出的稳定性[J]. 中国激光,2009,36(6):1347-1351.
Xu Pan, Hu Zhengliang, Ma Lina, et al. Output power stability of dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser [J]. Chinese Journal of Lasers,2009,36(6):1347-1351.
- [10] Bellemare A, Karúsek M, Rochette M, et al. Room temperature multifrequency erbium-doped fiber lasers anchored on the ITU frequency grid [J]. Journal of Lightwave Technology,2000,18(6):825-831.
- [11] Han Y G, Tran T V A, Lee S B. Wavelength-spacing tunable multiwavelength erbium-doped fiber laser based on four-wave mixing of dispersion-shifted fiber [J]. Optics Letters,2006,31(6):697-699.
- [12] 杨秀峰,魏芳芳,童峥嵘,等. 基于高精度度光纤滤波器的双波长光纤激光器[J]. 中国激光,2011,38(4):1-5.
Yang Xiufeng, Wei Fangfang, Tong Zhengrong, et al. Dual-wavelength fiber laser based on a high finesse fiber ring filter [J]. Chinese Journal of Lasers,2011,38(4):1-5.
- [13] Feng Suchun, Xu Ou, Lu Shaohua, et al. Switchable dual-wavelength erbium-doped fiber-ring laser based on one polarization maintaining fiber Bragg grating in a Sagnac loop interferometer [J]. Optics & Laser Technology, 2009,41:264-267.
- [14] Liu Yange, Dong Xinyong, Shum Ping, et al. Stable room-temperature multi-wavelength lasing realization in ordinary erbium-doped fiber loop lasers [J]. Optics Express,2006,14(20):9293-9298.
- [15] 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铒光纤激光器[J]. 中国激光,2011,38(11):1-8.
Bai Yangbo, Xiang Wanghua, Zu Peng, et al. Tunable two wavelength linear-cavity Yb-doped fiber laser based on volume grating [J]. Chinese Journal of Lasers,2011,38(11):1-8.

(责任编辑 王卫勋)