

基于耗散孤子共振的纳秒脉冲掺镱全光纤 激光器及其倍频

杨铁山 王秀红 孙若愚 李燕苹 程昭晨 李辉辉 师红星 刘江 王璞

北京工业大学激光工程研究院, 国家产学研激光技术中心, 北京 100124

摘要 报道了一种新型纳秒脉冲 532 nm 绿光激光器, 其基频光为耗散孤子共振(DSR)方波纳秒脉冲, 由掺镱光纤激光器得到, 该激光器采用了全光纤主振荡功率放大(MOPA)结构设计。利用非线性偏振旋转(NPR)锁模技术, 掺镱光纤激光种子源产生了稳定的 DSR 方波纳秒脉冲激光输出, 输出激光的脉冲宽度随抽运功率的改变在 3~40 ns 之间可调。利用该 DSR 方波纳秒脉冲激光作为种子源, 经过一级非保偏结构掺镱光纤纤芯放大和两级全保偏结构掺镱光纤包层放大之后, 得到了平均功率为 6.95 W, 峰值功率为 4.4 kW 的脉冲激光输出。利用长度为 20 mm 的非线性晶体 LBO 作为频率转换器, 得到了平均功率为 2.1 W 的绿光激光输出, 相应的光光转换效率为 30.2%。

关键词 激光器; 光纤激光器; 光纤放大器; 线偏振; 倍频; 耗散孤子共振

中图分类号 TN248 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.0302006

Ytterbium-Doped Nanosecond-Pulsed All-Fiber Laser Based on Dissipative Soliton Resonance and Its Frequency-Doubling

Yang Tieshan Wang Xiuhong Sun Ruoyu Li Yanping Cheng Zhaochen

Li Huihui Shi Hongxing Liu Jiang Wang Pu

*National Center of Laser Technology, Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology,
Beijing 100124, China*

Abstract A novel nanosecond-pulsed, frequency-doubled green laser at 532 nm is reported, whose fundamental light is a dissipative soliton resonance (DSR) square-shaped, nanosecond pulse, which is obtained by all-fiber ytterbium-doped laser with master-oscillator power-amplifier (MOPA) system. The ytterbium-doped fiber seed laser generates stable DSR, square-shaped, nanosecond pulse by using nonlinear polarization rotation (NPR) mode-locked technology. The pulse width of the fiber laser can be stably turned from 3 ns to 40 ns by just changing the pump power. After one stage non polarization-maintained ytterbium-doped fiber and two stages polarization-maintained ytterbium-doped fiber amplification, the final output power is 6.95 W, corresponding to a peak power of 4.4 kW. The output of the all-fiber MOPA is launched into a 20 mm-long LBO crystal and a maximum second-harmonic power of 2.1 W is obtained at a fundamental power of 6.95 W with the optical conversion efficiency of 30.2%.

Key words lasers; fiber laser; fiber amplifier; linear polarization; frequency-doubled; dissipative soliton resonance

OCIS codes 140.3510; 140.3280; 060.2420; 140.3515

收稿日期: 2014-10-29; 收到修改稿日期: 2014-11-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61177048,61378088)

作者简介: 杨铁山(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事生物光子学中超快光纤激光光源方面的研究。

E-mail: tsyang8862@163.com

导师简介: 王璞(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤激光器、光纤放大器及新型光纤光学功能性器件等方面的研究。E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn(通信联系人)

1 引言

与传统固体激光器相比,光纤激光器具有光束质量好、转换效率高、结构紧凑等优点,在科学研究、工业制造、军事国防等领域具有广阔的应用前景,已迅速成为当前激光技术领域的研究热点^[1-5]。近年来,可见光波段的蓝绿光激光器发展迅速,在生物医学光学^[6](比如:激光眼科手术、血管性疾病治疗、超分辨率荧光成像、激光流式细胞分析仪)、激光彩色显示、激光精密加工^[7]以及作为光参量振荡器的抽运源^[8]等方面都有着广泛的应用^[6-9]。

目前产生绿光激光输出的方法主要有:上转换抽运发射绿光,半导体激光器直接发射绿光,以及非线性晶体光学频率转换等^[9]。其中非线性晶体光学频率转换使用较为普遍,并且转换效率较高。近几年来,由于绿光激光器的迫切应用需求,国内外很多研究小组都在研制高功率、短脉冲激光的产生、放大、以及非线性晶体光学频率转换^[10-16]。虽然很多报道都实现了高功率的基频激光及非线性光学频率转换产生的 532 nm 绿光激光输出,但采用大量的空间器件,使得结构相对复杂。对于已报道的纳秒脉冲激光的产生方式,主要有主动调 Q [声光调制器(AOM)、电光调制器(EOM)]和被动调 Q [半导体可饱和吸收镜(SESAM)、氧化石墨烯(GO)和 Cr:YAG 可饱和吸收体等]两种^[18],但主动调 Q 结构复杂,成本较高;被动调 Q 具有体积小,成本低廉等优点,但环境稳定性较差。考虑到以上两种产生纳秒脉冲激光的优劣势,本实验耗散孤子共振 DSR 方波纳秒脉冲通过非线性偏振旋转(NPR)锁模技术获得,并且方波纳秒脉冲激光的脉冲宽度随着抽运功率的改变在 3~40 ns 之间稳定可调。

本文报道了一种纳秒脉冲 532 nm 绿光激光器,其基频光为 DSR 方波纳秒脉冲、掺镱光纤激光器。种子源采用环形腔结构设计,DSR 方波纳秒脉冲的产生利用 NPR 锁模技术。种子激光经过三级掺镱光纤放大后,获得了平均功率为 6.95 W、峰值功率为 4.4 kW、偏振消光比(PER, R_{ps})为 18 dB 的线偏振激光输出。经过长度为 20 mm 的非线性晶体 LBO 频率转换,得到了平均功率为 2.1 W 的绿光激光输出,相应的光光转换效率为 30.2%。

2 实验装置

如图 1 所示,种子源掺镱锁模光纤激光器采用了全光纤、环形腔结构设计。激光器总腔长约 1020 m,主要包括 1 m 长单包层掺镱光纤(Nufern SM-YSF-HI)和约 1000 m 长 Nufern 1060-XP 单模光纤。抽运源采用中心波长为 976 nm、最大输出功率为 460 mW 的单模半导体激光器。抽运光通过波分复用器(WDM)耦合进掺镱增益光纤,增益光纤的纤芯直径为 7 μm ,数值孔径为 0.11,包层直径为 125 μm ,在 976 nm 处纤芯吸收系数为 250 dB/m。采用中心波长为 1064 nm,3 dB 线宽为 2.68 nm 的光谱滤波器来控制激光器的中心波长。被动锁模掺镱光纤激光器的脉冲输出是基于 NPR 机制,偏振相关隔离器(PD-ISO)和两个偏振控制器(PC1 和 PC2)用来保证环形腔内激光的无方向性运转和产生线偏振激光输出。脉冲激光从光纤分束器的 30% 端输出进入下一级放大,70% 端反馈到激光腔内循环。

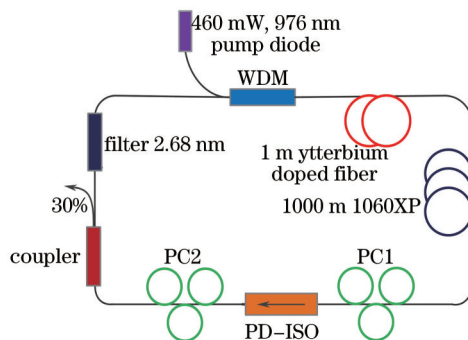


图 1 掺镱纳秒脉冲光纤激光器实验装置图

Fig.1 Experimental setup of ytterbium-doped nanosecond fiber laser

如图 2 所示,为了得到更高的输出功率,采用了三级掺镱光纤放大器对种子光功率进行放大。其中第一级为掺镱光纤预放大级,其主要作用是对种子光进行初级放大,以防止在功率放大时,因种子光功率不足,产生放大的自发辐射(ASE)。第一级光纤预放大级通过偏振无关隔离器(ISO)与种子源相连,抽运源使用中心

波长为 976 nm、最大输出功率为 460 mW 的单模半导体激光器。增益光纤为 1 m 长单包层掺镱光纤(Nufern SM-YSF-HI),其在 976 nm 处的纤芯吸收系数为 250 dB/m。激光输出时通过一个 3 dB 线宽为 2.68 nm 的光谱滤波器减弱放大过程中产生的 ASE 噪声。放大后的激光经过保偏隔离器(PM-ISO)后变成线偏振光进入下一级放大。第二级掺镱光纤预防大使用前向抽运的方式,抽运源采用中心波长为 976 nm、最大输出功率为 9 W 的半导体激光器。利用保偏合束器实现抽运光和信号光的耦合,增益光纤为 3.8 m 长的 LIEKKI Yb1200-6/125 保偏双包层掺镱光纤(PM-DCF),纤芯直径为 6 μm ,数值孔径为 0.15,内包层直径为 125 μm ,数值孔径为 0.46,该双包层光纤在 976 nm 处包层吸收系数为 2.6 dB/m,并通过 0.5 m 长相同芯径的保偏单包层光纤(Nufern 980-XP)进行抽运光的有效剥离。经过两级预放大后将信号光通过一个(2+1) \times 1 的保偏(PM)合束器耦合进入主放大级,抽运源采用中心波长为 976 nm、最大输出功率为 9 W 的 2 个多模半导体激光器。增益光纤为 1 m 长的 LIEKKI Yb1200-20/125 PM-DCF,纤芯直径为 20 μm ,数值孔径为 0.08,内包层直径 125 μm ,数值孔径为 0.46,该双包层光纤在 976 nm 处包层吸收系数为 30 dB/m,并通过 0.5 m 长相同芯径的保偏单包层光纤(LIEKKI Passive PM 20/125)进行抽运光的有效剥离。输出端面切成 8 $^\circ$ 角,避免产生菲涅耳反射,防止在功率放大器中产生寄生振荡影响激光特性。

经过掺镱光纤主振荡功率放大(MOPA)结构得到高功率线偏振、DSR 方波纳秒脉冲激光,经非球面镜 f_1 和 f_2 (其焦距分别为 8 mm 和 35 mm)两者组成的耦合聚焦透镜组,准直聚焦到 20 mm 长的非线性频率转换晶体 LBO 上,LBO 晶体放置于温控炉中,用于精确控制温度保证温度匹配。

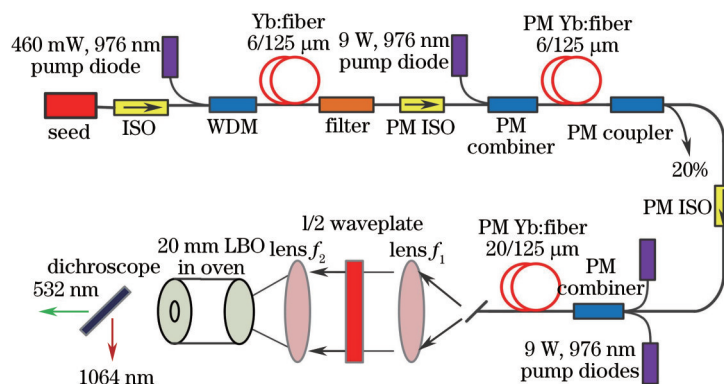


图 2 高功率全光纤结构掺镱光纤放大器实验装置及非线性频率转换装置图

Fig.2 Schematic setup of high-power ytterbium-doped all-fiber amplifier and nonlinear frequency-conversion

3 实验结果与分析

在单模半导体激光器注入抽运功率大约为 80 mW 时,适当调节偏振控制器(PC1 和 PC2),种子激光器开始出现稳定的锁模脉冲激光输出,其重复频率为 196 kHz,与激光器总腔长 1020 m 相吻合。图 3(a)是通过带宽 1 GHz 的示波器(Agilent DSO7104B)和 1.2 GHz 的光电探测器(Thorlabs DET01CFC)测得稳定的耗散孤子锁模脉冲串。当半导体激光器抽运功率为 90 mW 时,掺镱种子光纤激光器的输出功率约为 1 mW,其输出的单脉冲图形为方形脉冲结构,如图 3(b)所示,脉冲宽度约为 8 ns。在掺镱光纤激光种子源输出功率为 1 mW 时,使用分辨率为 0.02 nm 的光谱分析仪(YOKOGAWA AQ6370C)测得该种子激光的输出光谱如图 4 所示。从图中可看出种子源的中心波长为 1063.98 nm,3 dB 光谱线宽为 0.24 nm,光谱形状近似为洛伦兹型。且随着半导体激光器抽运功率的增加,发现激光器输出方形脉冲的输出功率、脉冲宽度与抽运功率成比例增加,脉冲宽度从 3 ns 到 40 ns 稳定可调,且脉冲的幅值保持不变,如图 5 所示。这与文献报道的被动锁模光纤激光器中 DSR 特性相吻合^[19-22]。

由于掺镱种子激光的输出功率较低,为了得到更高功率的激光输出,采用三级掺镱光纤放大器进行功率放大。种子激光偏振态随机,经偏振无关隔离器进入第一级掺镱光纤预防大,因为种子激光输出功率较低,使得放大器很容易产生 ASE,为保证高质量的 1064 nm 激光输出,加入了 3 dB 线宽为 2.68 nm 的光谱滤波器,ASE 噪声得到明显抑制。经过保偏光纤隔离器起偏后得到线偏振激光输出,测得激光输出功率为 20 mW。第二级

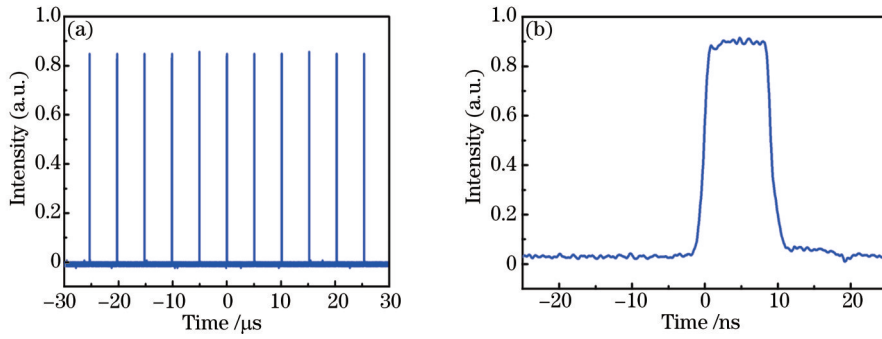


图3 种子源锁模光纤激光器的输出特性。(a) 脉冲串;(b) 单脉冲

Fig.3 Output characteristics of NPR mode-locked seed fiber laser. (a) Pulse train; (b) single pulse

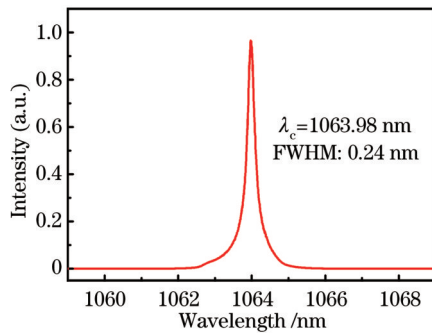


图4 种子源锁模光纤激光器的输出光谱
Fig.4 Output optical spectrum of mode-locked seed fiber laser

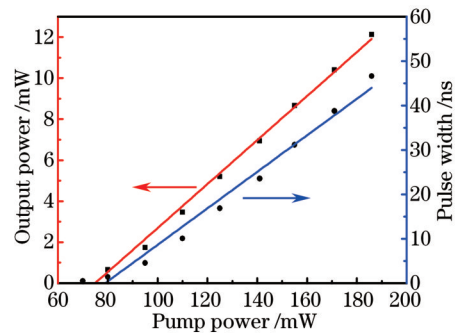


图5 种子源光纤激光器的输出功率、脉冲宽度与抽运功率的关系图
Fig.5 Output power and pulse width of seed fiber laser as a function of pump power

光纤预防大使用掺镱保偏光纤包层放大技术,线偏振输出的激光经过掺镱保偏光纤放大级后,其平均输出功率随抽运功率几乎呈线性增加。当抽运功率为1.8 W时,得到了平均功率约300 mW的激光输出,受该放大级中保偏光纤分束器可承受功率的限制,没有进一步提高输出功率。用示波器和光谱分析仪对分束器输出端脉冲进行监测,结果表明经过掺镱保偏光纤预放大级后,种子激光仍能维持稳定的锁模状态。

经过分束器80%输出端和保偏光纤隔离器后,进入掺镱保偏光纤主放大级,注入主放大级的信号光功率约为150 mW。如图6所示,掺镱保偏光纤主放大级的平均输出功率随抽运功率几乎呈线性增加,在抽运功率为15.9 W时,获得了平均功率为6.95 W的激光输出,峰值功率和单脉冲能量分别为4.4 kW和35.5 μJ,掺镱保偏光纤放大器相应的斜率效率为46%。在最大功率处没有出现饱和现象,表明通过增加抽运功率可实现更高功率的激光输出。对放大后的输出激光通过光束质量分析仪测得光束质量因子 $M^2=1.14$,如图6插

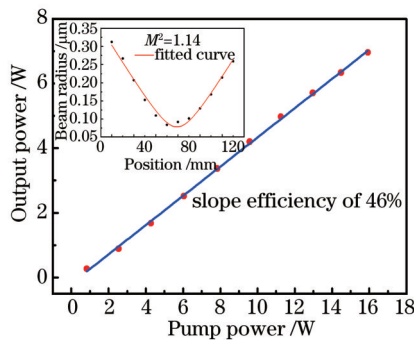


图6 平均输出功率随抽运功率的变化
(插图为光束质量拟合曲线)

Fig.6 Average output power versus pump power (Insert shows the fitted curve of the fundamental beam quality)

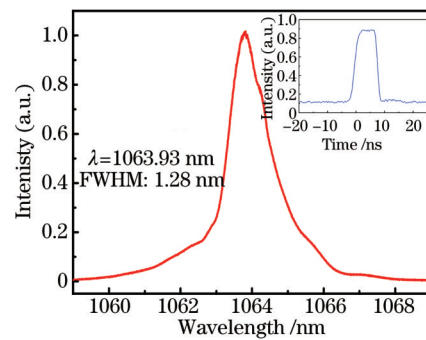


图7 保偏掺镱光纤放大器的输出光谱特性
(插图为单脉冲)

Fig.7 Characteristic of the polarization-maintained ytterbium-doped amplifier (Insert shows a single-pulse)

图所示。用示波器和光谱分析仪对输出激光脉冲进行监测,结果表明放大后的锁模脉冲串与种子源无明显区别,仍能够维持稳定的锁模状态,如图7所示,脉冲宽度为8 ns。在最大平均输出功率为6.95 W时测得激光的中心波长为1063.93 nm,3 dB线宽为1.28 nm,基本与种子激光的中心波长保持一致,只是由于自相位调制(SPM)导致光谱展宽。为了检测输出激光脉冲的线偏振特性(通常用PER或偏振度来表示),将输出端激光通过透镜进行准直后,先后通过置于带有角度刻度调整架上的半波片和偏振片,固定偏振片位置,旋转半波片一周,在不同旋转角度下,通过功率计测量平均输出功率,读出最大值和最小值,根据PER公式: $R_{ps}=10 \lg(P_{max}/P_{min})$,测得输出激光脉冲的PER是18 dB。

经过主振荡功率放大结构得到的高功率线偏振、DSR方波纳秒脉冲激光,经由非球面镜 f_1 和 f_2 (其焦距分别为8 mm和35 mm)两者组成的耦合聚焦透镜组,准直聚焦到20 mm长的倍频晶体LBO上,选择LBO晶体是因为相对于PPLN和KTP晶体,其具有较高的损伤阈值。腰斑位置处聚焦光斑的直径为80 μm ,相应的瑞利长度约为12 mm。在两个非球面镜之间加入一个半波片,用于调整入射到晶体的基频光的偏振方向,保证晶体的非线性相位匹配,同时LBO晶体放置于温控炉中,精确控制温度以获得最大功率的绿光激光输出。双色镜镀有对1064 nm高反、532 nm高透的膜层,双色镜呈45°角放置,将倍频绿光和剩余基频光分开。倍频光(SHG)输出功率与基频光抽运功率转换关系如图8所示,在最佳匹配温度为152.4 °C时,当基频光抽运功率为6.95 W时得到最大平均功率为2.1 W的绿光激光输出,其输出光谱如图9所示,中心波长为531.84 nm,3 dB光谱线宽为0.41 nm,相应的光光转换效率为30.2%,这主要受限于基频光光谱宽度由于SPM效应展宽以及相应的峰值功率较低。适当增加峰值功率可以得到更高平均功率的绿光激光输出,相应的频率转换效率也会得到进一步提高。

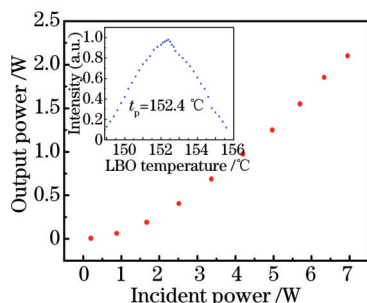


图8 倍频光输出功率与基频光的关系图
(插图为LBO晶体的温度转换曲线)

Fig.8 Dependence of the SHG on the fundamental signal
(Insert shows the temperature tuning curve of the LBO crystal)

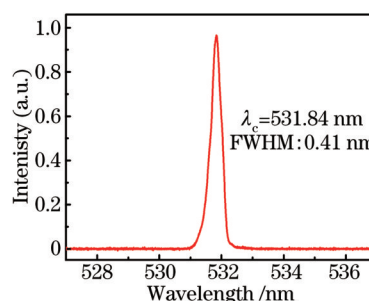


图9 输出功率2.1 W时倍频绿光的光谱图

Fig.9 Output spectrum of the frequency-doubled green light at power of 2.1 W

4 结 论

报道了一种新型纳秒脉冲532 nm绿光激光器,其基频光为DSR方波纳秒脉冲、掺镱全光纤激光器。种子源激光器采用环形腔结构设计,利用非线性偏振旋转(NPR)锁模技术产生DSR方波纳秒脉冲。经掺镱光纤MOPA技术,获得了平均功率为6.95 W、峰值功率为4.4 kW、PER为18 dB的线偏振激光输出,最后一级掺镱保偏光纤放大器的斜率效率为46%。经过长度为20 mm的非线性晶体LBO作为频率转换,在152.4 °C匹配温度下,得到平均功率为2.1 W的绿光激光输出,相应的光光转换效率为30.2%。该类基于DSP的方波纳秒脉冲掺镱全光纤激光倍频的绿光激光器可广泛应用于超分辨荧光成像、激光加工等领域。

参 考 文 献

- 1 Sun Ruoyu, Jin Dongchen, Cao Yi, *et al.*. Hundred-watt-level 1030 nm ytterbium-doped picosecond all-fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1002004.
孙若愚, 金东臣, 曹 懿, 等. 百瓦级1030 nm皮秒脉冲掺镱全光纤激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1002004.
- 2 Li Yanping, Liu Jiang, Shi Hongxing, *et al.*. High power linearly-polarized picosecond pulsed ytterbium-doped all-fiber laser[J].

- Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1102008.
- 李燕苹, 刘江, 师红星, 等. 高功率线偏振皮秒脉冲掺镱全光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1102008.
- 3 Chen Shengping, Lin Dongfeng, Hou Jing, *et al.*. Passively mode-locked Yb-doped fiber laser with nearly 2W average output power [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(11): 2817-2821.
- 陈胜平, 林东风, 侯静, 等. 平均功率近 2 W 的被动锁模皮秒掺镱光纤激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(11): 2817-2821.
- 4 Wang Yuanxiang, Jiang Peipei, Yang Dingzhong, *et al.*. All-fiberized master oscillator power amplifier structured pulsed Yb fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1861-1865.
- 汪园香, 姜培培, 杨丁中, 等. 全光纤结构主振荡功率放大大型掺镱脉冲光纤激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1861-1865.
- 5 Liu Jiang, Wang Pu. High-power narrow-bandwidth continuous wave thulium-doped all-fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0102001.
- 刘江, 王璞. 高功率窄线宽全光纤结构掺铥连续光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0102001.
- 6 A Bachmann, S Wyler, R Ruszat, *et al.*. 80 W high-power KTP laser vaporization of the prostate clinical results after 110 consecutive procedures[C]. Eur Urol, 2004, 3(2): 145-145.
- 7 J Golden. Green lasers score good marks in semiconductor material processing[J]. Laser Focus World, 1992, 28(6): 75-88.
- 8 F Kienle, K K Chen, S Alam, *et al.*. A high-power, variable repetition rate, picosecond optical parametric oscillator pumped by an amplified gain-switched diode[J]. Opt Express, 2010, 18(8): 7602-7610.
- 9 Shi Mengjing. LD pumped All-Solid-State Green Laser[D]. Fujian: Xianmen University, 2008. 21-30.
- 石梦静. LD 泵浦全固体连续绿光激光器[D]. 福建: 厦门大学, 2000. 21-30.
- 10 Dong Xiaolin, Xiao Hu, Ma Yanxing, *et al.*. High power polarization-maintaining master oscillator power amplifier fiber laser in all-fiber format[J]. Acta Phys Sin, 2012, 61(6): 064207.
- 董小林, 肖虎, 马阎星, 等. 高功率全光纤保偏主振荡功率放大大型光纤激光器的实验研究[J]. 物理学报, 2012, 61(6): 064207.
- 11 A Liu, M A Norsen, R D Mead, *et al.*. 60 W green output frequency doubling of a polarized Yb-doped fiber laser[J]. Opt Lett, 2005, 31(1): 67-69.
- 12 A V Babushkin, D V Gapontsev, N S Platonov, *et al.*. Pulsed fiber laser with 30W output power at 532 nm[C]. SPIE, 2006, 6102: 61021E.
- 13 P Dupriez, J K Sahu, A Malinowski, *et al.*. 80 W green laser based on a frequency-doubled picosecond, single-mode, linearly-polarized fiber laser[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2006. CThJ1.
- 14 P Dupriez, J K Sahu, Y Jeong, *et al.*. High-power, high-brightness green laser based on frequency doubled picosecond fiber laser [C]. SPIE, 2007, 6453: 64531H.
- 15 H Yu, J Zhou, X Wu, *et al.*. 40 W picosecond fiber amplifier with the large mode-area polarized crystal fiber[J]. Laser Phys Lett, 2009, 6(9): 653-656.
- 16 K K Chen, S Alam, J R Hayes, *et al.*. 56 W frequency-doubled source at 530 nm pumped by a single-mode, single-polarization, picosecond, Yb³⁺-doped fiber MOPA[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2010, 22(12): 893-895.
- 17 Zhi Zhao, Bruce M Dunham, Frank W Wise. Generation of 167 W infrared and 124 W green power from a 1.3-GHz, 1-ps rod fiber amplifier[J]. Opt Express, 2014, 22(21): 25065-25070.
- 18 Liu Jiang, Wang Pu. High-power passively Q-switched nanosecond-pulsed thulium-doped fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1202006.
- 刘江, 王璞. 高功率被动调 Q 纳秒脉冲掺铥光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1202006.
- 19 W Chang, A Ankiewicz, J M Soto-Crespo, *et al.*. Dissipative soliton resonances in laser models with parameter management[J]. J Opt Soc Am B, 2008, 25(12): 1972-1977.
- 20 Xianming Zhang, Chun Gu, Guoliang Chen, *et al.*. Square-wave pulse with ultra-wide tuning range in a passively mode-locked fiber laser[J]. Opt Lett, 2012, 37(8): 1334-1336.
- 21 Zhaochen Cheng, Sida Wu, Hongxing Shi, *et al.*. Dissipative soliton resonance in an all-normal-dispersion graphene oxide mode-locked Yb-doped fiber laser[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2013, CM11.6.
- 22 Li Mei, Guoliang Chen, Lixin Xu, *et al.*. Width and amplitude tunable square-wave pulse in dual-pump passively mode-locked fiber laser[J]. Opt Lett, 2014, 39(11): 3235-3237.