

# 混合放大 100 MHz 高重复频率窄脉宽单频激光器

刘崇 张翔 叶志斌 王毅 项震\* 陈军

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 利用高速光强度调制器对线宽为 70 kHz 的单频连续(CW)光纤激光器发出的激光进行调制, 获得了 100 MHz 高重复、1 ns 窄脉宽激光输出, 调制后脉冲激光的线宽小于 0.8 GHz。利用光纤激光放大器和 Nd:YVO<sub>4</sub> 固体激光放大器的混合放大装置进行放大, 在一级固体激光放大后输出平均功率为 13 W, 在二级固体激光放大后获得了 32.9 W 的脉冲激光输出。实验中对调制后单频窄脉宽的小信号激光采用光纤激光放大器进行预放大, 预放大输出激光功率达到 2 W 后采用固体激光放大器放大, 从而避免了单频窄脉宽激光在光纤放大器中极易产生的受激散射和放大自发辐射(ASE)所导致的放大器损坏。放大后的激光仍保持了 0.8 GHz 线宽和 1 ns 脉宽、100 MHz 重频。这样的输出激光在一些特殊要求中可以获得应用。

**关键词** 激光器; 脉冲激光器; 单频; 高重复

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0402006

## Single Frequency Laser with 100 MHz Repetition Rate and 1 ns Pulse Width Using Combined Amplification

Liu Chong Zhang Xiang Ye Zhibin Wang Yi Xiang Zhen Chen Jun

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** Pulsed laser with 100 MHz repetition rate and 1 ns pulse width is obtained by intensity modulating a continuous wave (CW) single frequency fiber laser with 70 kHz line width. The spectrum line width of the modulated pulsed laser is less than 0.8 GHz. A combined amplification setup with a fiber amplifier and two solid-state amplifiers is used to achieve power amplification of the pulsed laser. The output average powers are 13 W and 32.9 W after first and second solid-state laser amplifier, respectively. The small signal of the modulated pulsed laser is firstly amplified up to 2 W by a fiber pre-amplifier. The pre-amplified laser transmits the two solid-state main amplifiers for further power amplification. The combined amplification setup effectively weakens the stimulated scattering and amplified spontaneous emission (ASE) in the fiber amplifier. After amplification, the output laser preserves line width of 0.8 GHz with pulse width of 1 ns and repetition rate of 100 MHz. Such a laser output with single frequency, narrow pulse width and high repetition rate is required in many special applications.

**Key words** lasers; pulsed laser; single frequency; high repetition rate

**OCIS codes** 140.3538; 140.3280; 140.3570

## 1 引言

窄线宽高重复频率固体激光器以其线宽窄、噪声低等优点在光纤通信、光纤传感、材料技术等领域有着重要的应用。近些年来,随着天文光学的发展,高重复、窄线宽光纤激光器在地基天文观测领域又有了新的

应用前景。目前国内外研究中,实现高重复频率的方法主要有调 Q、锁模、调制三大类<sup>[1-14]</sup>。调 Q 方法以声光调 Q 为主,到目前为止,国内外以激光二极管(LD)抽运声光调 Q 方式工作的激光,可达到的最高脉冲重复频率为兆赫兹量级<sup>[2-3]</sup>,调 Q 脉冲的宽度在

收稿日期: 2013-10-08; 收到修改稿日期: 2013-11-18

基金项目: 国家自然科学基金委-中国工程物理研究院联合基金(11076025)、国家自然科学基金(U1230101)、质检公益性行业科研专项经费(201210061)

作者简介: 刘崇(1978—),男,副教授,主要从事激光与非线性光学等方面的研究。E-mail: chongliu78@hotmail.com

\* 通信联系人。E-mail: xiangzhen@zju.edu.cn

几纳秒到几十纳秒的范围。锁模方法可实现几兆赫兹到百兆赫兹的重复频率,脉冲宽度在皮秒到百皮秒量级,由于大部分研究没有采取任何选纵模措施,其谱线宽度非常大,波长稳定性也受到限制。

对连续激光进行调制获得高重复窄脉宽的方法在光通信领域有较多的研究和应用,目前最高调制频率甚至可高达 40 GHz,调制器件波长也均在通信波段。对光纤激光器 1064 nm 输出激光进行外调制实现高重复窄脉宽的方法,目前见到报道的有美国 Aculight 公司的 Loftus 等<sup>[1]</sup>在进行光纤激光器的光谱光束合成的研究中,以单纵模外腔二极管激光器作为主振荡器种子,对其输出的窄线宽连续激光进行调制。并通过多级光纤激光器作预放,再经过光纤二级放大,获得了重复频率为 10 MHz、脉宽为 5 ns、线宽小于 1 GHz 的脉冲激光,输出平均功率超过 100 W。

本文报道了一种获得高功率、高重复频率、窄线宽、窄脉冲激光的方法,利用高速光强度调制器对单频连续激光光源进行调制,获得了 100 MHz 高重复、1 ns 窄脉宽的激光输出,调制后脉冲激光的线宽小于 0.8 GHz。利用光纤激光放大器和固体激光放大器的混合放大装置进行功率放大,最终获得了 32.9 W 的脉冲激光输出。这种混合式放大的方法,既可以在小信号的情况下利用光纤放大器单模和偏振态保持的优势,又可以利用固体放大器功率抽取效率高的优势,从而避免了使用光纤放大器作高功率放大时在窄线宽窄脉冲和高重复频率条件下极易

产生的受激散射效应和放大自发辐射(ASE)效应,进而避免高功率下的光纤放大器的损坏。

## 2 实验装置和步骤

高重复窄脉宽激光混合放大实验装置如图 1 所示。由单频连续光纤激光器通过单模光纤进入高速光强度调制器,利用超高频任意波发生器产生 100 MHz 重复频率、1 ns 脉冲宽度的电信号作为调制信号对连续激光进行调制,调制后的激光信号通过光纤隔离器进入光纤放大器。

单频连续光纤激光器采用丹麦 NKT 公司型号为 Koheras BASIK Module Y10 的单频连续光纤激光器,输出的单频连续激光中心波长为 1064.2 nm,并且可以在  $\pm 0.35$  nm 范围内连续可调,输出激光为线偏振光,线宽为 70 kHz,最大平均功率为 10 mW,光束质量因子  $M^2 < 1.05$ 。高速光强度调制器采用法国 Photline 公司产品,调制中心波长为 1064 nm,输出线偏振光,调制脉冲宽度典型值为 1 ns,脉冲重复频率可达 500 MHz,典型值为 100 MHz。超高频任意波发生器采用美国 Tektronix 公司 AWG7122B 任意波发生器,采样率为 12 GS/s。由该任意波发生器所产生的高重复脉冲电信号控制高速光强度调制器,获得所需的调制信号,以此来控制被调制的激光重复频率和脉冲宽度。实验中调制频率可以从 10 MHz 连续变化到 100 MHz,调制脉冲宽度从 1 ns 连续变化到 10 ns。

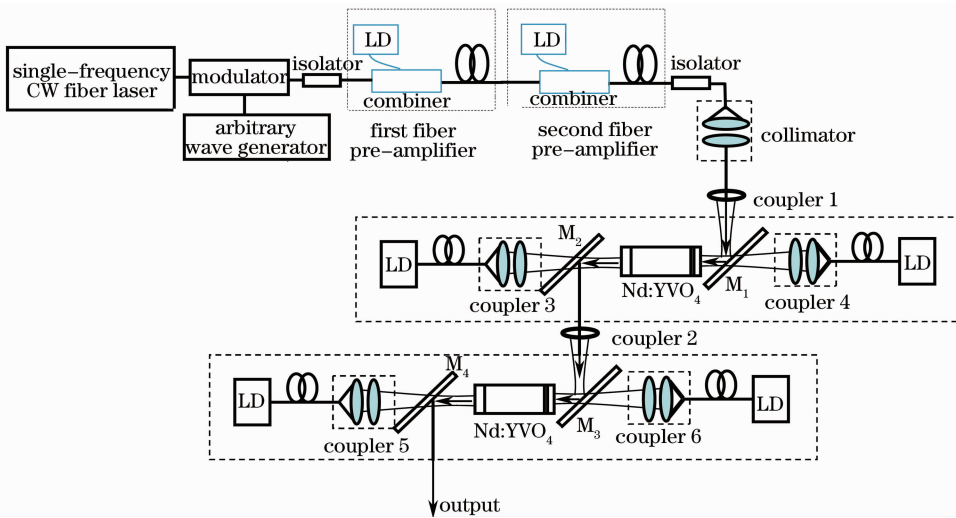


图 1 外调制 100 MHz, 1 ns 单频混合式激光放大装置示意图

Fig. 1 Schematic of the 100 MHz, 1 ns external modulated single frequency laser using combined amplification

实验中的调制典型值为重复频率 100 MHz,脉冲宽度 1 ns。这一调制信号对连续激光进行调制,得到

调制后的脉冲激光输出的平均功率小于 1 mW。经过单模保偏光纤的耦合,调制激光通过光纤隔离器进入

光纤预放大器。光纤预放大器由两级组成,其中一级预放使用了 Nufern 公司型号为 PM-YSF-HI 的单模光纤,长度为 7.5 m,芯径为 6  $\mu\text{m}$ ,包层为 125  $\mu\text{m}$ ,数值孔径(NA)为 0.110,抽运光源为波长为 980 nm 的 LD。一级预放后的脉冲激光经过隔离器和合束器后进入光纤二级预放,二级预放使用的是型号为 PLMA-YDF-10/125-VIII 的双包层光纤,长度为 6.5 m,芯径为 10  $\mu\text{m}$ ,包层为 125  $\mu\text{m}$ ,NA 为 0.075,采用 975 nm 的 LD 模块抽运。经过一级预放大器后的输出平均功率在几十毫瓦,经过光纤二级预放大器后的输出平均功率可以达到 2 W。

由光纤放大器输出的脉冲激光经过偏振隔离器、准直器、耦合透镜,再由双色耦合镜  $M_1$  反射到 LD 双端面抽运的 Nd:YVO<sub>4</sub> 固体激光放大器进行放大。耦合透镜 coupler1 的焦距  $f$  在 100 ~ 500 mm 间可调,透镜到固体激光放大器的右端面之间的距离为  $2f$ 。固体激光放大器中的抽运光源为德国 DILAS 公司生产的高功率光纤耦合输出的半导体激光器,光纤端面直径为 400  $\mu\text{m}$ ,NA 为 0.22,LD 输出 50 W 中心波长为 808 nm 的激光,从介质 Nd:YVO<sub>4</sub> 复合晶体两个端面入射到晶体内进行抽运。双色耦合镜  $M_1$  和双色输出镜  $M_2$  对 808 nm 抽运光具有高透射率,使得抽运光在放大过程中损耗很小;对 1064 nm 激光具有高反射率。耦合透镜 coupler2 和耦合透镜 coupler3 的表面以及固体激光介质 Nd:YVO<sub>4</sub> 复合晶体两个端面都镀了对 808 nm 抽运光和 1064 nm 激光具有高透射率的介质膜,以减少抽运光和放大激光在放大过程中的损耗,耦合

透镜 coupler2 和耦合透镜 coupler3 到 Nd:YVO<sub>4</sub> 复合晶体的二个端面之间的距离对称。基于 Nd:YVO<sub>4</sub> 的偏振吸收特性和偏振输出特性,应使得单纵模光纤激光器输出激光的偏振方向与 Nd:YVO<sub>4</sub> 的偏振吸收方向一致。经过晶体放大后输出的 1064 nm 激光平均功率达到 13 W,从双色输出镜  $M_2$  反射出第一放大器。在第一级固体放大器后安置第二级固体放大器,第二级放大器与第一级的结构完全相同,在此不再累述。经过第二级放大后,激光输出的平均功率达到 32.9 W,偏振消光比大于 50:1。

### 3 实验结果

#### 3.1 脉冲波形

从第二级固体放大后输出的调制激光经衰减后用电电接收器接收,检测其重复频率和脉冲宽度,并在示波器上显示。光电接收器为 Thorlabs 公司型号为 FDS02 的 PIN 光电二极管,上升沿为 47 ps,下降沿为 246 ps。示波器为美国 Tektronix 公司的 TDS5032B 示波器,带宽为 1 GHz,实时取样速率为 5 GS/s。图 2(a)为任意波发生器产生的 100 MHz 高重复、1 ns 窄脉宽的调制电信号右上角附图为重复率脉冲,电信号直接输到示波器的输入端,图中纵坐标为 50 mV/div。图 2(b)为经过二级固体激光放大后输出 32.9 W 时的激光脉冲波形,右上角附图为相应重复率脉冲,图中纵坐标为 2.0 mV/div,脉冲信号波形稳定,与调制信号波形几乎保持一致。

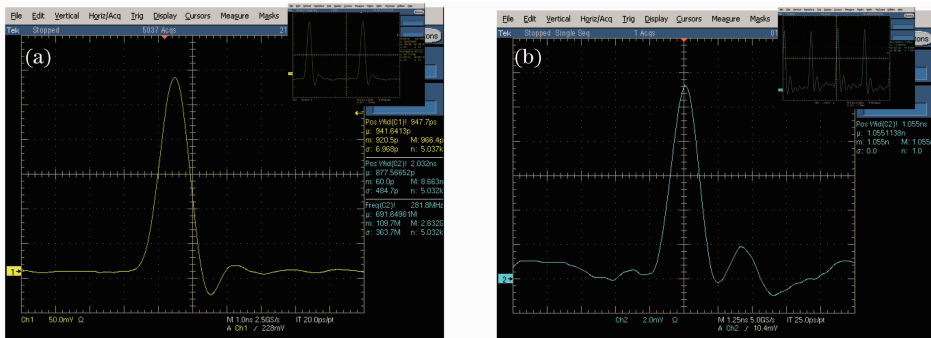


图 2 (a) 任意波发生器产生的重复频率 100 MHz,脉宽 1 ns 电信号;(b) 经过固体激光放大后输出的激光脉冲波形

Fig. 2 (a) 100 MHz, 1 ns electric signal from arbitrary wave generator; (b) output laser pulse waveform from the solid state laser amplifier

#### 3.2 输出功率

实验中将单频种子光源输出功率调节在 8 mW 固定不变,一级光纤预放大级的抽运电流也固定不变,调节并逐渐增大二级光纤预放大器的抽运电流,

从 1 A 一直增加到最大值 8 A,光纤预放大器中相应的抽运功率从 0.6 W 增大到 6.5 W,这时光纤放大器输出的光功率从 10 mW 增加到 2.1 W。一级 Nd:YVO<sub>4</sub> 固体放大器的抽运功率固定为 66 W,二

级 Nd:YVO<sub>4</sub> 固体放大器的抽运功率固定为 70 W, 当二级光纤预放大器的抽运功率(横坐标)逐渐增加到最大值 6.5 W 时, 一级固体放大器输出的平均功率达到 13 W, 二级固体放大器输出的平均功率达到 32.9 W。输出功率的实验结果如图 3 所示。

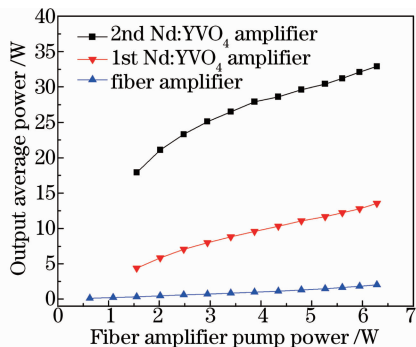


图 3 经光纤放大器和一级及二级 Nd:YVO<sub>4</sub> 固体激光放大器后输出激光的平均功率

Fig. 3 Average output power after fiber amplifier, the first and second solid-state Nd:YVO<sub>4</sub> laser amplifiers

实验中保持两级固体放大器的抽运功率固定不变, 通过改变光纤预放大器的抽运功率来调节最终输出功率, 是因为光纤预放大器是通过单模保偏光纤耦合输出的, 在调节光纤预放大器的抽运功率时, 从光纤输出光束的特性(光束质量和发散角等)基本保持不变, 对后续的激光放大性能影响不大。当然也可以通过改变两级固体放大器的抽运功率来调节最终输出功率, 但是由于固体放大器中的抽运功率在很大程度上影响了增益介质中的热效应, 同时会对输出光束特性产生改变, 这样在多级固体放大器中需要不断调节级间光束匹配才可以获得最佳输出效果, 这对于实际应用会带来很大的复杂性, 而且最终输出光束的特性也会产生相应的变化, 不利于后续的应用。所以实验中采用了固定固体放大器的抽运功率而仅仅改变光纤二级预放大器抽运功率的方式, 此时固体放大器中增益介质的热透镜效应是固定的, 通过调整一级和二级固体放大器之间的耦合和补偿, 来优化并获得最佳的光束质量和最大的输出功率。

### 3.3 谱线宽度

连续激光经振幅调制成为脉冲激光后, 谱线宽度会被展宽, 这是由信号的傅里叶变换特性决定的。对于光强分布为  $I(t)$  的光脉冲, 通过傅里叶变换可以得到其频谱的强度分布  $S(\nu)$ , 即能量谱、脉冲宽度  $\Delta t$  和频谱宽度  $\Delta\nu$  满足  $\Delta t \Delta\nu \geq K$ , 其中,  $\Delta t$  和  $\Delta\nu$  分别是  $I(t)$  和  $S(\nu)$  的半峰全宽(HWFM)值,  $K$  为系数<sup>[15-17]</sup>。对于理想的矩形脉冲,  $K = 1$ , 即有

$\Delta t \Delta\nu \geq 1$ 。而当光脉冲波形是高斯型分布时, 得到  $K = 0.441$ 。事实上, 相比矩形脉冲, 高斯脉冲没有了尖锐的拐角, 故减少了高频分量, 使其谱线宽度更窄。本实验中脉冲如图 2 所示接近高斯型, 计算其谱线宽度如下:

取高斯函数作为脉冲光的振幅分布, 表达式为

$$A(t) = \exp(-\pi a^2 t^2), \quad (1)$$

光强表达式为

$$I(t) = \exp(-2\pi a^2 t^2) = \exp\left(\ln \frac{1}{2}\right) \left(\frac{t}{\Delta t/2}\right)^2, \quad (2)$$

式中  $a = \frac{2}{\Delta t} \sqrt{\frac{-\ln(1/2)}{2\pi}}$ ,  $\Delta t$  为光强脉冲的 HWFM, 它就是激光脉冲宽度的理论值。对(1)式作傅里叶变换并取其模平方, 得到脉冲光强的能量谱:

$$S(\nu) = |\mathcal{F}[A(t)]|^2 = \left| \frac{1}{|a|} \exp\left(-\pi \frac{\nu^2}{a^2}\right) \right|^2. \quad (3)$$

激光脉冲的谱线宽度  $\Delta\nu$  即为(3)式表达的能量谱函数的 HWFM, 由(1)~(3)式可得理想谱线宽度为

$$\Delta\nu = 2a \sqrt{\frac{\ln(1/2)}{-2\pi}} = \frac{1}{\Delta t} \times \frac{\ln(1/2)}{-\pi} = \frac{0.44127}{\Delta t}. \quad (4)$$

实际的高斯脉冲谱线宽度必须满足  $\Delta\nu \geq 0.441/\Delta t$ 。本实验中  $\Delta t = 1$  ns, 必有  $\Delta\nu \geq 0.441$  GHz。

实验中将输出激光倍频后, 使用自由光谱范围为 40 GHz 的固定间隙石英法布里-珀罗(F-P)标准具检测其谱线分布, 图 4 是用 F-P 标准具测量得到的干涉环。图中可以看出激光为良好的单纵模输出, 从环的间隔和环线宽度可以初步估算输出激光线宽在 1 GHz 以下。实验搭建了扫描 F-P 干涉仪精确测量谱线宽度, 测得的扫描谱线如图 5 所示。扫描 F-P 干涉仪的自由光谱范围为 4.88 GHz, 根据测得的曲线可以计算出输出激光的谱线宽度为

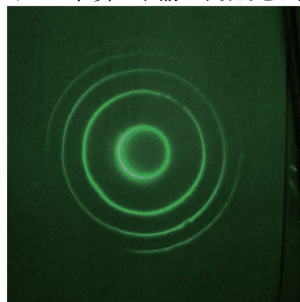


图 4 光束倍频后的 F-P 标准具干涉环

Fig. 4 Interference ring of F-P etalon of beam after frequency doubling



0.8 GHz。实验中的调制光信号脉冲接近高斯型脉冲,对线宽为 70 kHz 连续激光调制后,脉宽为 1 ns 脉冲信号的线宽为 0.8 GHz。

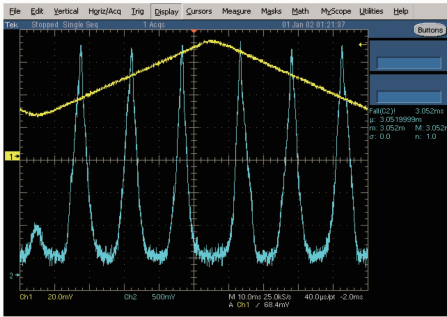


图 5 扫描 F-P 干涉仪测量的 1064 nm 激光谱线  
Fig. 5 1064 nm laser spectrum measured by a scanning F-P etalon

实验中由于采用了对调制后单频窄脉宽的小信号激光采用光纤激光放大器放大,而对放大后的 2 W 输出功率时用固体激光放大器放大,从而避免了单频窄脉宽激光在光纤放大器中极易产生的受激

散射和 ASE 所导致的放大器损坏。实验表明,对于 100 MHz、1 ns 调制状态下,在光纤激光放大中没有观察到受激散射(例如受激布里渊散射)和 ASE 现象,同时观察到经过固体激光放大后的脉冲宽度没有展宽。

### 3.4 光束质量

对一级和二级固体激光放大器进行了仔细调整,综合考虑抽运光束半径和光束的填充因子等因素<sup>[18-20]</sup>,在激光功率获得放大的同时可以获得很好的光束质量。实验中对经过各级放大后的光束质量进行了测量,使用 Spiricon 公司型号为 BG-USB-SP620 的 CCD 测量光束直径,并对束腰位置附近处的光束直径进行双曲线拟合,得到光束质量因子  $M_x^2$  和  $M_y^2$  值,光纤放大后为 1.22 和 1.29,经过一级固体放大后为 1.26 和 1.17,经过二级放大后为 1.47 和 1.46。图 7 给出的是对种子激光进行调制,并经过光纤放大和固体激光放大后用 CCD 测量的输出激光光斑图和光束质量因子  $M^2$  测量的实验结果。

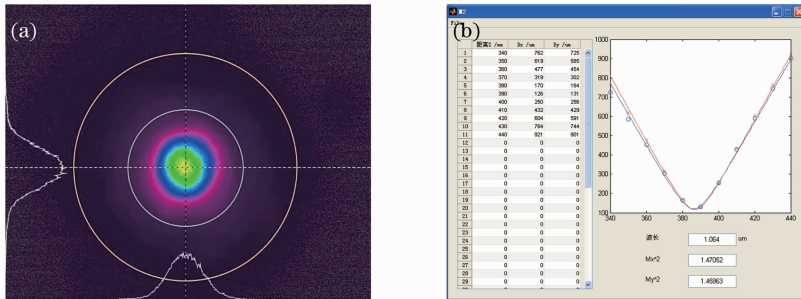


图 6 (a) 输出激光平均功率 32.9 W 时的激光光斑记录; (b)  $M^2$  测量的实验结果  
Fig. 6 (a) Laser spot with average output power of 32.9 W; (b) measured result of  $M^2$

## 4 结 论

利用高速调制器调制单频连续激光,可以获得百兆赫兹的高重复频率,由于调制器的重复频率和脉宽可以连续变化,采用这种方法可以获得所需要的各种调制频率和脉宽。本文对线宽 70 kHz 的单频激光进行了 100 MHz、1 ns 的调制,并通过光纤放大器和两级 Nd:YVO<sub>4</sub> 固体激光放大器放大,最终的激光输出平均功率达到 32.9 W,光束质量因子  $M^2$  小于 1.5。实验表明,对于 100 MHz、1 ns 调制状态下,在光纤激光放大中没有观察到受激散射和 ASE 现象。实验也观察到,经过固体激光放大后的脉冲宽度没有增大。使用扫描 F-P 干涉仪测量,输出激光的线宽在 0.8 GHz。这样的输出激光在一些特殊要求中可以获得应用。

## 参 考 文 献

- 1 Thomas H Loftus, Anping Liu, Paul R Hoffman, *et al.*. 258 W of spectrally beam combined power with near-diffraction limited beam quality[J]. SPIE, 2006, 6102: 1-8.
- 2 K Nawatal, M Okidal, K Furuki, *et al.*. Sub-100 W picosecond output from a phase-conjugate Nd:YVO<sub>4</sub> bounce amplifier[J]. Optics Express, 2009, 17(9): 20816-20823.
- 3 K Nawatal, M Okidal, K Furuki, *et al.*. MW ps pulse generation at sub-MHz repetition rates from a phase conjugate Nd:YVO<sub>4</sub> bounce amplifier[J]. Optics Express, 2007, 15(15): 9123-9128.
- 4 Liu Xia, Du Songtao, Xue Yuhao, *et al.*. High repetition rate nanosecond pulse fiber amplifier based on China-made large-mode-area fiber[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1876-1879. 刘 侠, 杜松涛, 薛宇豪, 等. 基于国产大模场面积双包层光纤的高重复频率纳秒脉冲光纤放大器[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1876-1879.
- 5 Mao Xiaojie, Mi Guojiang, Deng Mingfa, *et al.*. 200 kHz, 8 ns passively Q-switched high peak power Nd:YAG laser[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(S1): 20-23. 毛小洁, 秘国江, 邓明发, 等. 200 kHz, 8 ns 被动调 Q 高峰值功率 Nd:YAG 激光器[J]. 中国激光, 2010, 37(S1): 20-23.

- 6 Liu Jia, Liu Jiang, Wang Pu. Cladding pumped nanosecond passively Q-switched Yb-doped fiber laser with  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG as saturable absorber [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1102002.  
刘 佳, 刘 江, 王 璞.  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 被动调 Q 纳秒脉冲包层抽运掺镱光纤激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1102002.
- 7 Xia Jie, Hu Haihua, He Jinglei. Passively Q-switched laser operation of composite  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG- $\text{Nd}^{3+}$ :YAG crystal fiber[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(6): 754-756.  
夏 洁, 胡海华, 何经雷.  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG- $\text{Nd}^{3+}$ :YAG 复合型单晶光纤及其被动调 Q 激光器[J]. 中国激光, 2005, 32(6): 754-756.
- 8 Ren Fang, Xiang Wanghua, Zu Peng, *et al.*. Experimental study on Er/Yb Co-doped double-clad all fiber laser [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(3): 622-625.  
任 芳, 向望华, 祖 鹏, 等. Er/Yb 共掺双包层全光纤激光器的实验研究[J]. 中国激光, 2010, 37(3): 622-625.
- 9 Liao Mingdun, Wang Zhengping, Yu Haohai, *et al.*. Nd:GdVO<sub>4</sub>/Cr:YAG microchip pulse laser [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(12): 2954-2958.  
廖明墩, 王正平, 于浩海, 等. Nd:GdVO<sub>4</sub>/Cr:YAG 微片式脉冲激光器[J]. 中国激光, 2010, 37(12): 2954-2958.
- 10 Su Rongtao, Zhou Pu, Xiao Hu, *et al.*. MOPA structured single-frequency nanosecond pulsed laser in all fiber format [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1102013.  
粟荣涛, 周 朴, 肖 虎, 等. MOPA 结构的单频纳秒脉冲全光纤激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1102013.
- 11 He Jing, He Hongming, Zhou Jun, *et al.*. Single-ended fiber coupled acousto-optic Q-switched all-fiber laser [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0502008.  
何 晶, 赵宏明, 周 军, 等. 单端光纤耦合的声光调 Q 全光纤化光纤激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0502008.
- 12 Gu Qingyuan, Hou Jing, Cheng Xiang'ai, *et al.*. All-fiber passive mode-locked laser realized by semiconductor saturable absorber mirror [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(5): 655-660.  
谷庆元, 侯 静, 程湘爱, 等. 利用半导体可饱和吸收镜实现的全光纤被动锁模激光器[J]. 中国激光, 2008, 35(5): 655-660.
- 13 Su Rongtao, Zhou Pu, Wang Xiaolin, *et al.*. Dependence of stimulated Brillouin scattering in pulsed fiber amplifier on signal linewidth, pulse duration, and repetition rate [J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(11): 111402.
- 14 Thomas H Loftus, Anping Liu, Paul 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.
- 15 Koechner W. Solid-State Laser Engineering [M]. New York: Springer, 2006.
- 16 Goodman J W. Introduction to Fourier Optics [M]. New York: McGRAW-HILL, 1996.
- 17 Mai Weilin. Optical Transfer Function and Mathematical and Physical Bases [M]. Beijing: Defence and Industry Press, 1979.  
麦伟麟. 光学传递函数及其数理基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.
- 18 Zhao Zhigang, Pan Sunqiang, Xiang Zhen, *et al.*. Influences of spherical aberration on resonator's stable zones and fundamental mode output power scaling of solid state laser oscillators [J]. Opt Express, 2012, 20(10): 10605-10616.
- 19 Zhao Zhigang, Dong Yantao, Pan Sunqiang, *et al.*. 50 W class double-end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> TEM<sub>00</sub> mode solid state laser oscillator [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(9): 0902001.  
赵智刚, 董延涛, 潘孙强等. 50 W 量级双端抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 基模固体激光振荡器 [J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0902001.
- 20 Xiang Zhen, Wang Dan, Li Tong, *et al.*. Numerical simulation and analysis for gain guiding effect in master oscillator power amplifier lasers [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0502004.  
项 震, 汪 丹, 李 通, 等. 主振荡功率放大激光器增益导引效应的数值模拟及分析 [J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0502004.

栏目编辑:宋梅梅