

基于1064 nm光纤皮秒种子源的Nd:YAG再生放大器*

连富强¹⁾²⁾ 樊仲维^{1)3)†} 白振岍³⁾ 余锦¹⁾ 林蔚然¹⁾
 张晓雷³⁾ 刘迪⁴⁾ 赵天卓¹⁾

1) (中国科学院光电研究院, 北京 100094)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

3) (北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100190)

4) (海特光电有限责任公司, 北京 102206)

(2013年12月30日收到; 2014年2月19日收到修改稿)

利用Nd:YAG再生放大器,对1064 nm掺镱锁模全光纤激光器输出的皮秒脉冲进行了功率放大. 研究分析了掺镱锁模全光纤激光器输出脉冲对Nd:YAG再生放大器能量提取效率的影响,通过对掺镱锁模全光纤激光器自相位调制的控制,减少了输出光谱的振荡结构,提高了掺镱锁模全光纤激光器对Nd:YAG再生放大器的能量提取效率,实现了对锁模全光纤激光器输出的中心波长1064.4 nm, 3 dB光谱宽度0.35 nm、脉宽11 ps、单脉冲能量为3.2 nJ、频率为38 MHz的锁模脉冲的再生放大,得到输出重复频率为1 kHz,最大的单脉冲能量为1.3 mJ的皮秒脉冲.

关键词: 超快光学, 被动锁模, 可饱和吸收, 再生放大技术

PACS: 42.60.-v, 42.60.Da

DOI: 10.7498/aps.63.134207

1 引言

高脉冲能量、高光束质量的超短脉冲激光器的发展,逐步得到了行业的广泛关注,包括工业高精度冷加工、高效谐波变换和天文测距等^[1-5]. 2012年,闫莹等^[6]将Nd:YVO₄锁模激光器输出的百毫瓦皮秒脉冲注入到Nd:YVO₄再生放大器中,获得了重复频率1 kHz、脉冲能量1.5 mJ的皮秒脉冲激光,2013年,陈檬等^[7]采用相近的技术方案讨论了普克尔盒脉宽对Nd:YVO₄再生放大器输出脉冲稳定性的影响,得到了高重复频率100 kHz、脉冲能量212 μJ的再生皮秒脉冲激光,上述的激光系统的皮秒种子源都是Nd:YVO₄锁模激光器,由于其锁模采用了离散的器件,因此其受外界环境振动影响较大,锁模的稳定性要比全光纤锁模激光器差,2012年,瞿叶玺等^[8]利用非线性偏振旋转将环形

腔锁模光纤激光器输出的皮秒脉冲注入到低温工作状态下的Yb:YAG再生放大器,得到了重复频率10 Hz、最大脉冲能量为217 μJ的皮秒脉冲,但环形腔锁模光纤激光器采用的锁模方式为非线性偏振旋转(NPR)锁模启动慢,需要调整偏振控制器的偏振方向,较难实现锁模的自启动,这使得其工业应用受到了限制,在本文中,我们设计了一款可以实现稳定锁模自启动的光纤激光器,将输出的皮秒脉冲注入到Nd:YAG再生放大器中,得到输出重复频率为1 kHz,最大的单脉冲能量为1.3 mJ的皮秒脉冲.

2 实验装置

光纤种子源采用了主振荡功率放大结构MOPA,如图1所示. 光纤振荡器加一级光纤放大器,谐振腔采用了线性腔结构,半导体可饱和

* 中国科学院光电研究院自主部署项目-雏鹰计划资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: fanzhongwei@aoe.ac.cn

吸收镜 SESAM 和光纤光栅 FBG 分别作为线性腔的全反镜和输出镜, 同时半导体可饱和吸收镜 SESAM 在腔内又提供了可饱和的损耗, 波分复用器采用的是滤波片式, 抽运光进入波分复用器后经过镜片的反射进入增益光纤, 增益光纤采用的是高掺杂的掺镱光纤, 腔内所有光纤器件采用了保偏结构, 激光器直接输出沿快轴传输的线性偏振光, 种子输出的光脉冲经过保偏光纤隔离器进入一级功率放大, 放大器部分的增益介质与种子内的增益介质为同种类光纤, 光纤放大器采用了反向抽运, 目的是为了降低放大器内非线性效应对脉冲的影响。

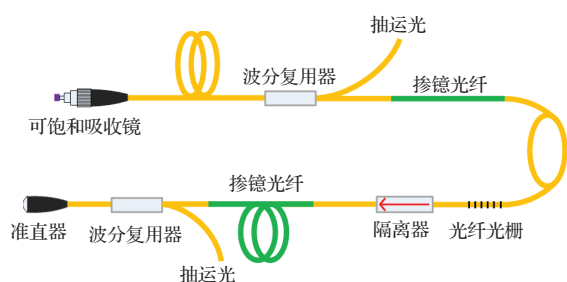


图1 光纤锁模激光器

再生放大器系统的装置如图2所示。光纤种子

源输出的锁模脉冲经过1/2波片与偏振分光棱镜的组合(图中未表示出)将功率的10%与同步触发信号发生器同步, 剩余90%的功率经过图中的空间隔离器耦合进入Nd: YAG再生放大器, 其中激光工作物质为掺杂原子分数为0.5%的Nd: YAG晶体, 两个端面镀有808 nm, 1064 nm高透膜, 抽运光耦合透镜组为光斑面积1: 3准直聚焦透镜, 激光晶体内光斑直径约为1.2 mm, M_3 , M_4 , M_6 和 M_7 为凹面反射镜, 镀1064 nm高反膜, M_3 和 M_7 的曲率半径 $R_3 = R_7 = 2$ m, M_4 和 M_6 的曲率半径 $R_4 = R_6 = 900$ mm, M_5 为平面反射镜, 镀1064 nm高反、808 nm高透膜, 抽运光为808 nm光纤耦合半导体激光器, 最大的输出功率为12 W, 光纤纤芯直径为400 μm , 驱动电源的重复频率为1 kHz, 脉冲宽度为100 μs ; 再生放大腔长为1.7 m, 对应激光在谐振腔内往返一周的时间为11.3 ns;

再生放大器中我们采用了BBO晶体作为电光开关的晶体, 其优点是: 具有高的抗损伤阈值和高的消光比、受温度影响小、具有快的加压反应时间和1/4波长电压适中, 实验中采用的BBO晶体尺寸为4 mm $\times$ 4 mm $\times$ 20 mm, 1/4波长电压约为4600 V。

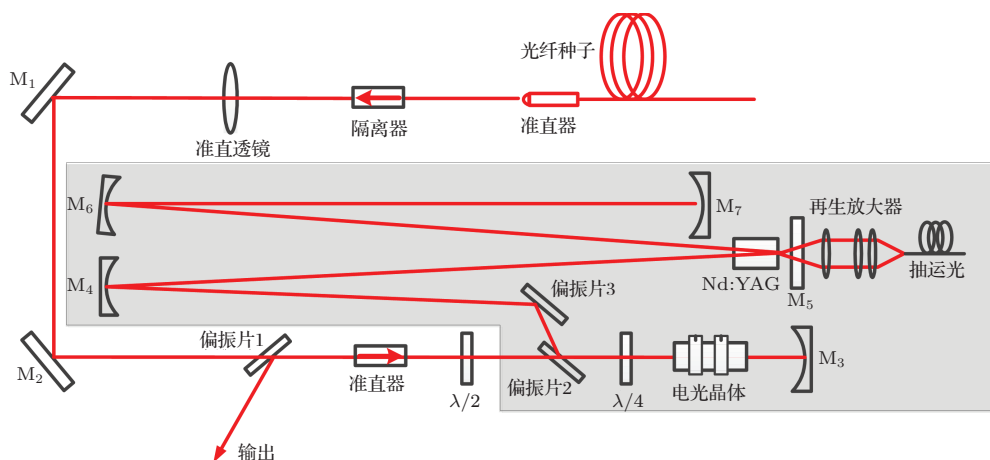


图2 激光系统整体装置图

3 实验结果与分析

光纤种子源输出的锁模脉冲重复频率为38 MHz, 图3是光谱仪(YOKOGAWA-AQ6370B)测量的光纤种子源输出的功率为120 mW时的锁模脉冲光谱图形, 我们首先将具有蓝色曲线的锁模脉冲注入到再生放大器中, 发现此时再生放大功率很低, 无法实现大的能量提取效率, 原因是Nd: YAG

晶体的辐射波长为1064.4 nm, 而此时蓝色曲线是由于锁模脉冲在功率放大过程中光谱形状出现了畸变, 导致了在1064.4 nm处的功率过低, 因此无法实现高的能量提取效率。

Stolen等曾利用氩离子激光器输出的90 ps的脉冲经过芯径为3.35 μm 的光纤发现了输出光谱的振荡结构^[9], 在本实验中如图3中的蓝色曲线, 在中心波长1064.4 nm处光谱出现了小的峰值, 展宽后的光谱由多峰组成, 且最外侧的峰强度最大, 产

生的振荡峰的个数随锁模脉冲在光纤内积累的非线性相移 $\Phi_{\max}$ 线性增加, 产生上述现象的原因是由于光纤内的自相位调制 SPM, 通常同样大小的啁啾出现在脉冲包络内两个不同的 T 值处, 这表明在这两个点有相同的瞬时频率, 即这两点代表具有相同频率但不同相位的两个波, 具有相同相位便会发生干涉相长, 具有相反相位便会发生干涉相消^[10], 这便是造成光谱多峰结构的原因, 光谱内呈现振荡结构的峰个数决定于最大的非线性相移 $\Phi_{\max}$, 如下式^[11]:

$$\Phi_{\max} = \gamma P_0 L_{\text{eff}} = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{\text{eff}}} P_0 L_{\text{eff}}, \quad (1)$$

n_2 为非线性折射率, ω_0 为脉冲中心角频率, A_{eff} 为光束有效截面积, P_0 为脉冲的峰值功率, 上式表明由 SPM 引入的非线性相移 $\Phi_{\max}$ 与脉冲的峰值功率 P_0 成正比.

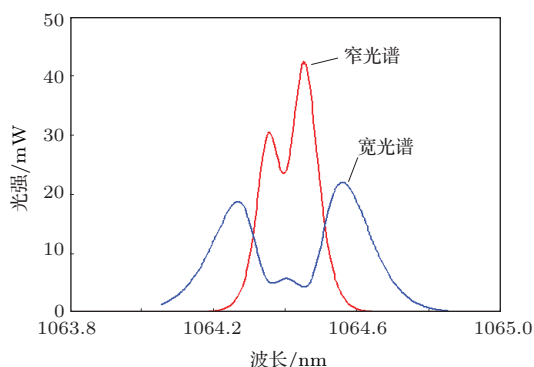


图3 (网刊色彩) 光纤种子源输出的光谱图

自相位调制 SPM 导致的频谱的展宽需要考虑频率啁啾 $\delta\omega(T)$, 频率啁啾 $\delta\omega(T)$ 是将上述方程求导得到的频谱的变化, 其表示瞬时变化的相位在光脉冲包络中有不同的光频率, 其数值代表了距离中心频率 ω_0 的差值, 针对高斯脉冲其频率啁啾为

$$\delta\omega(T) = 2L\gamma P_0 \frac{T}{T_0^2} \exp\left(-\left(\frac{T}{T_0}\right)^2\right). \quad (2)$$

上式表明, 频率啁啾 $\delta\omega(T)$ 与脉冲在光纤中的传输距离 L 和脉冲的峰值功率 P_0 成正比, 即脉冲峰值功率 P_0 越大那么由于 SPM 感应出现的新频率越多, 脉冲在光纤内传输的距离 L 越长那么由于 SPM 感应出现的新频率越多, 将上式对 T 求导, 可以得到频率啁啾 $\delta\omega(T)$ 的最大值, 针对高斯脉冲

$$\delta\omega_{\max} = 0.86\Delta\omega_0\Phi_{\max}. \quad (3)$$

频谱展宽程度与脉冲的频谱宽度以及最大的非线性相移成正比, 因此为了降低 SPM 导致的频谱的展宽需要减少入射脉冲的频谱宽度 $\Delta\omega_0$ 以及减小非线性相移 $\Phi_{\max}$, 减小非线性相移 $\Phi_{\max}$ 在很大程度上人们倾向于减小脉冲的峰值功率 P_0 , 这与我们的实验目的是不符合的, 因此我们决定从频谱宽度 $\Delta\omega_0$ 宽度入手来降低 SPM 导致的频率啁啾的影响; 针对线性腔光纤激光器采用更窄光谱宽度的光纤光栅, 进而来降低 SPM 导致的光谱多峰结构, 采用的光纤谱宽为 0.15 nm, 中心波长为 1064.4 nm, 图 3 中的红色曲线代表了采用窄线宽后光纤种子源输出的光谱图形, 通过与原光谱图形进行比较可以发现此时由 SPM 引起的光谱凹陷不再明显, 说明利用窄光谱宽度的光纤光栅可以有效的降低 SPM 引入的频率啁啾, 这对光谱的整形具有很好的作用, 此时我们将得到的红色曲线光谱形状的锁模脉冲注入到再生放大器中实现了再生功率放大, Nd: YAG 晶体放在束腰位置, 能量密度处于最大值, 再生放大后得到的最大的平均功率为 1.3 W, 再生放大后的光谱图如图 4 所示, 中心波长是 1064.4 nm, 由于 Nd:YAG 晶体的增益窄化作用, 功率放大后的光谱宽度变小, 此时 3 dB 光谱宽度为 0.27 nm, 由于光纤种子脉冲注入到再生放大器内的锁模脉冲依然存在 SPM 导致的频率啁啾, 所以再生放大后的光谱存在少量的次峰, 这是由于前期在光纤种子源阶段积累的非线性相移导致的, 此时适当的降低再生放大器的抽运功率便可以得到光滑的光谱形状, 再生放大器输出的脉冲序列重复频率为 1 kHz, 最大的单脉冲能量可以达到 1.3 mJ, 图 5 是采用 Femtochrome 公司自相关仪 (FR-103MN) 测得的脉冲自相关信号, 通过计算脉冲的宽度为 16.7 ps.

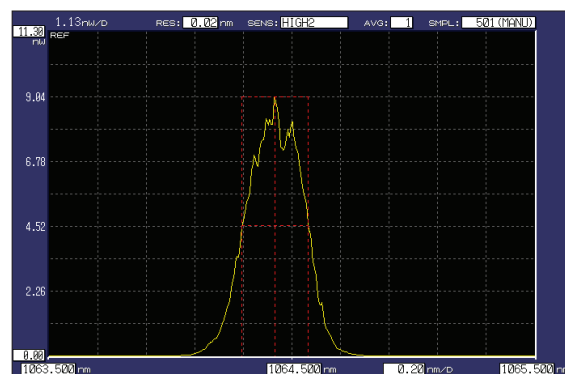


图4 再生放大器输出的光谱图

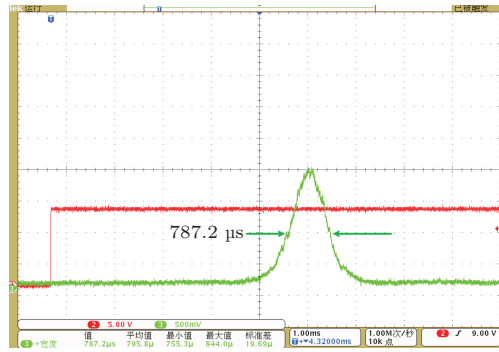


图5 再生放大器输出的自相关信号

4 结 论

本文研究了锁模光纤种子源输出的锁模脉冲光谱与再生放大器晶体Nd:YAG增益带宽匹配的问题, 通过对线性腔锁模光纤激光器光谱畸变的抑制, 利用Nd:YAG再生放大器的放大, 将锁模光纤激光器输出的38 MHz的皮秒脉冲序列经过BBO电光晶体的选单, 得到重复频率1 kHz、单脉冲能量1.3 mJ的皮秒脉冲, 相比以往采用常规固体锁模激光器作为再生放大器的种子源, 本方案为皮秒再生放大器的锁模种子源提供了一个新的研究方向.

参考文献

- [1] Wang L, Yu G H, Yu L H, Liang X Y, Ren Z J, Xu Y, Lu X M 2012 *Chin. Phys. B* **21** 014201
- [2] Yang J M, Yang Q, Liu J, Wang Y G, Yuen H T 2013 *Chin. Phys. B* **22** 094210
- [3] Zhang Z L, Liu Q, Yan P, Xia P, Gong M L 2013 *Chin. Phys. B* **22** 054206
- [4] Liu C, Wang Z H, Shen Z W, Zhang W, Teng H, Wei Z Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 094209 (in Chinese)[刘成, 王兆华, 沈忠伟, 张伟, 腾浩, 魏志义 2013 物理学报 **62** 094209]
- [5] Bai Y B, Xiang W H, Zu P, Zhang G Z 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 214208 (in Chinese)[白杨博, 向望华, 祖鹏, 张贵忠 2012 物理学报 **61** 214208]
- [6] Yan Y, Fan Z W, Niu G, Song Y L, Yu J 2012 *Laser & Optoelectronics Progress* **49** 021402 (in Chinese) [闫莹, 樊仲维, 牛岗, 宋亚丽, 余锦 2012 激光与光电子学进展 **49** 021402]
- [7] Chen M, Chang L, Yang C, Chen L Y, Li G 2013 *Chinese J. Lasers* **40** 0602010 (in Chinese) [陈檬, 常亮, 杨超, 陈立元, 李港 2013 中国激光 **40** 0602010]
- [8] Qu Y X, Pan X, Huang W F, Wang J F, Li X C, Ouyang X P 2012 *Chinese J. Lasers* **39** 0802003 (in Chinese) [瞿叶玺, 潘雪, 黄文发, 王江峰, 李学春, 欧阳小平 2012 中国激光 **39** 0802003]
- [9] Stolen R H, Lin C 1978 *Phys. Rev. A* **17** 1448
- [10] Shimizu F 1967 *Phys. Rev. Lett.* **19** 1097
- [11] Govind P. A 2007 *Nonlinear Fiber Optics* (New York: Academic Press) p80

A Nd:YAG regenerative amplifier seeded by 1064 nm picosecond fiber*

Lian Fu-Qiang¹⁾²⁾ Fan Zhong-Wei^{1)3)†} Bai Zhen-Ao³⁾ Yu Jin¹⁾ Lin Wei-Ran¹⁾
Zhang Xiao-Lei³⁾ Liu Di⁴⁾ Zhao Tian-Zhuo¹⁾

1) (*The Academy of Opto-electronics, Beijing 100094, China*)

2) (*University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China*)

3) (*Beijing GK Laser Technology Co., Ltd, Beijing 100190, China*)

4) (*Hi-Tech Optoelectronics Co., Ltd, Beijing 102206, China*)

(Received 30 December 2013; revised manuscript received 19 February 2014)

Abstract

The picosecond pulse from 1064 nm Yb-doped all-fiber mode-locked laser is amplified by Nd: YAG regenerative amplifier. Research is focused on the influence of Yb-doped all-fiber mode-locked laser on the efficiency of energy extraction of Nd: YAG regeneration amplifier. In order to increase the efficiency of energy extraction, spectral oscillatory fringe is decreased by means of restricting the self-phase modulation of Yb-doped all-fiber mode-locked laser. The Nd:YAG regenerative amplifier produces stable pulse energy of 1.3 mJ at a repetition rate of 1 kHz, which is seeded by a Yb-doped all-fiber mode-locked laser, with a low energy of 3.2 nJ, center wavelength of 1064.1 nm, 3 dB bandwidth of 0.35 nm 11 ps duration.

Keywords: ultrafast optics, passive mode locked, saturable absorption, regeneration amplifier

PACS: 42.60.-v, 42.60.Da

DOI: 10.7498/aps.63.134207

* Project supported by the Self-Deployment Foal Eagle Program of the Academy of Opto-Electronics.

† Corresponding author. E-mail: fanzhongwei@aoe.ac.cn