

1030 nm 皮秒级光参量啁啾脉冲放大抽运源

瞿叶玺 潘 雪 黄文发 王江峰 李学春 欧阳小平

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 利用低温工作状态下 Yb:YAG 再生放大器,对 1030 nm 光纤锁模激光器输出的 250 pJ 的种子光进行放大。电光开关门宽控制种子光在放大器内 20 程往返,最大单脉冲能量为 217 μJ ,输出频率 10 Hz,同时由于其增益窄化效应光谱宽度由 8.9 nm 减小到 0.3 nm,相应的脉宽由 18.0 ps 被压缩到 5.5 ps,这与理论模拟结果的 0.4 nm, 4.2 ps 基本吻合。实验结果论证了采用窄增益带宽的再生放大器可以同时实现亚皮秒光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)对抽运脉冲宽度和光谱宽度的要求,避免使用光纤光栅对光谱滤波带来的高阶非线性效应。

关键词 激光器;光纤锁模激光器;再生放大器;增益窄化;光参量啁啾脉冲放大

中图分类号 TN245 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0802003

1030 nm Picosecond Level Optical Parametric Chirped Pulse Amplification Pump

Qu Yexi Pan Xue Huang Wenfa Wang Jiangfeng Li Xuechun Ouyang Xiaoping

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract A 250 pJ seed pulse from 1030 nm fiber mode-locked laser is amplified by cryogenic Yb:YAG regenerative amplifier. After the seed pulse is amplified by 20 circles by controlling the electro-optical switch, the max single pulse energy is 217 μJ , the output rate is 10 Hz. Meanwhile, the spectrum decreases from 8.9 nm to 0.3 nm for gain narrowing, the corresponding pulse width is compressed from 18.0 ps to 5.5 ps, which fits the simulated result of 0.4 nm and 4.2 ps. The experimental result demonstrates that regenerative amplifier using gain narrowing can realize the require for pump pulse width and spectrum width of subpicosecond optical parametric chirped pulse amplification (OPCPA), and avoid high order nonlinear effect by fiber grating.

Key words lasers; mode-locked fiber laser; regenerative amplifier; gain narrowing; optical parametric chirped pulse amplification

OCIS codes 140.3280; 140.3480; 140.3580; 140.5560

1 引 言

在超短超强激光脉冲打靶实验中,靶面激光强度多在 $10^{18} \sim 10^{21} \text{ W/cm}^2$, 预脉冲或主脉冲底座光强达到 $10^8 \sim 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 时会使靶物质气化或产生预等离子体,会在主激光脉冲到来之前改变靶物质的状态,从而影响作用过程或改变作用机制,所以要求压缩以后点火脉冲主脉冲前 10 ps 以外的信噪比要大于 10^{10} 。信噪比已经成为快点火实验的瓶颈,国内外已经有大量文献研究提高超短激光脉冲信噪比的方法^[1,2]。超短超强激光脉冲放大过程中的噪

声主要产生于高增益的光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)预放阶段,它具有信噪比高,增益高,光束质量高和宽带放大等优点,是目前国内外发展高能短脉冲激光系统和将来发展 10^{18} W 超高功率激光系统的核心技术^[3]。根据参量荧光受制于抽运光的时间窗口效应^[4],使用高增益的皮秒域窄脉宽抽运OPCPA和低增益的纳秒域OPCPA相结合的双级OPCPA方法,对种子光进行参量放大的同时,可以有效地降低主脉冲周围的噪声能量和时域宽度,从而得到高信噪比高能量的放大注入种子光。英国的

收稿日期: 2012-03-01; 收到修改稿日期: 2012-04-24

作者简介: 瞿叶玺(1988—),男,硕士研究生,主要从事重复频率短脉冲抽运源方面的研究。E-mail: qyx@siom.ac.cn

导师简介: 李学春(1972—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光技术与光纤应用方面的研究。

E-mail: lixuechun@siom.ac.cn

Vulcan 装置已经采用此方法有效地限制了纳秒时域范围内的参量荧光,将纳秒时域的信噪比提高到了 10^{10} 的量级,其中关键单元技术就是高强度皮秒域窄脉冲抽运源的实现^[5]。

Yb:YAG 晶体在相同的 LD 抽运辐射下产生的热量只有 Nd:YAG 的 1/3 左右,这种明显减少的热散耗,是抽运光子与激光辐射之间非常小的能量差产生的结果。其光学效率随温度降低可以得到线性提升,其发射截面和热导率会随温度的降低而得到进一步地提高,所以 Yb:YAG 晶体具有高的量子效率、高的热传导率、以及高的掺杂浓度等特性,使数千赫兹放大器成为可能^[6]。欧洲的 ELI 装置的整体设计报告中就采用了 Yb:YAG 再生放大器作为预放的主要器件,日本在低温 Yb:YAG 晶体再生放大器上得到了 8 mJ, 35 ps 的输出^[7],国内也有很多人在 Yb:YAG 激光器及放大器方面进行了研究^[8~10],本课题组也研制出 10 Hz, 10 mJ, 10^7 增益的 1030 nm 低温 Yb:YAG 再生放大器,作为皮秒域窄脉冲抽运源的主要预放装置^[11]。

由于参量放大的增益与抽运光光强的平方成正比, 10^6 的参量增益需要抽运功率密度为 5 GW/cm^2 以上,此外根据参量荧光受制于抽运光的时间窗口效应,抽运光脉冲宽度要小于 10 ps。实验上抽运光和信号光来自于同一个种子源,这样可以满足 OPCPA 中抽运光和信号光之间的高精度同步的要求。种子源采用自制的锁模激光器,其输出为宽带啁啾脉冲,且参量放大要求抽运光的光谱最宽为信号光的 1/10,因此本文利用 1030 nm 低温 Yb:YAG 再生放大器窄的增益线宽,在对锁模激光器输出的宽带啁啾脉冲放大的同时,根据增益窄化效应,得到百微焦 0.3 nm, 5.5 ps 的输出光,经过后续的功率放大和倍频从而得到所需的抽运脉冲。

2 实验装置

利用非线性偏振旋转效应结合啁啾脉冲光谱滤波法自制了一台光纤锁模激光器作为种子源^[12],如图 1 所示。该环形腔结构激光器中主要有在线偏振器(ILP)、两个偏振控制器(PC1、PC2)、高掺杂 Yb³⁺ 光纤、偏振无关光隔离器(ISO)、980 nm/1030 nm 波分复用器(WDM)、1030 nm 滤波器(SF)、分束耦合器和 980 nm LD 抽运源。Yb³⁺ 掺杂光纤在 LD 抽运下发出自发辐射噪声,经过 ILP 后变成线偏振光,再通过调节 PC2,变成椭圆偏振光。该椭圆偏振光为两个偏振方向正交的线偏振光的叠加,这两束线

偏振光经过掺杂光纤的放大后由于自相位调制效应,会产生与光强有关的偏振旋转效应,脉冲峰值处与边沿部分产生不同的偏转量,调节 PC1,使得脉冲峰值偏振方向与 ILP 偏振方向相同,则峰值通过而脉冲边沿被阻挡,实现脉冲压缩,多次循环之后就可实现锁模输出。ISO 使得光纤内激光只沿逆时针方向传输,SF 将频谱的边沿滤掉,抑制色散引起的脉宽加宽,可以压缩脉冲、提高锁模自启动能力、提高激光器稳定性,并提高脉冲能量。

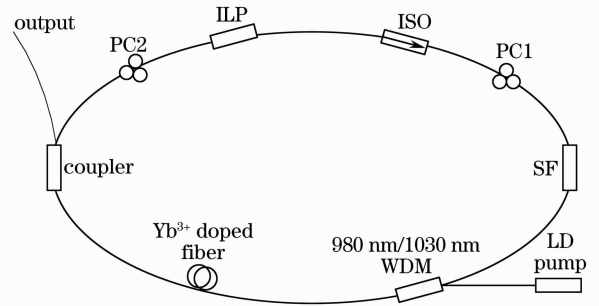


图 1 光纤锁模激光器

Fig. 1 Mode-locked fiber laser

整个系统的实验装置如图 2 所示。种子源出来的锁模脉冲经过 9:1 分束器后分成两路,能量的 10% 与 DG535 产生的微秒同步信号一起送到同步触发信号发生器(STSG)后产生与锁模光脉冲同步的电脉冲信号,控制再生放大器的电光开关泡克耳斯盒(PC)的开启和关闭,从而控制种子脉冲的注入和输出;剩余的 90% 能量经过偏振控制器调节成 p 偏振光后注入到低温 Yb:YAG 再生放大器中。薄膜偏振片 TFP1 为起偏器,p 光完全透射,第一组 $\lambda/2$ 波片与法拉第旋转器(FR)共同组成隔离器,防止残余反射光耦合到光纤中破坏锁模激光器。p 光经过第二组 $\lambda/2$ 波片的 FR 后变成 s 光,经过 33° 反射镜 M1 和 TFP3 注入到再生放大器谐振腔中,两次经过 $\lambda/4$ 波片后偏振方向旋转 90° 为 p 光,透过 TFP3 经过 M3, M4 折叠镜进入 Yb:YAG 晶体被放大。Yb:YAG 晶体靠近抽运源的一端镀有 1030 nm 增反膜和 940 nm 增透膜作为谐振腔的端镜,晶体放在真空密闭室内由液氮制冷维持 -90°C 的低温环境。PC 在光第二次经过电光晶体之后,第三次到达电光晶体之前加上 $\lambda/4$ 电压,这样在 $\lambda/4$ 波片和 PC 的作用下光脉冲一直维持 p 偏振态在再生放大器谐振腔中多次经过激光晶体不断被放大,由于种子脉冲序列间隔 65.6 ns,大于光在再生腔内走一圈的时间 30 ns,所以再生放大器只能套住其中一个脉冲在腔内不断放大,这样再生放大器的输出频率完全取

决于 PC 的频率,不用调整注入脉冲的重复频率。当放大到一定能量时,把电光晶体上的电压降为 0,被放大的光脉冲两次经过 $\lambda/4$ 波片后偏振方向旋转 90° 为 s 光,由 TFP3、M1、TFP2、M5 反射输出。再

生放大器的抽运源为 DILAS 公司生产的 M1F-IS9 半导体激光器,在 940 nm 时最大输出为 120 W,由 DG535 的另一路控制。

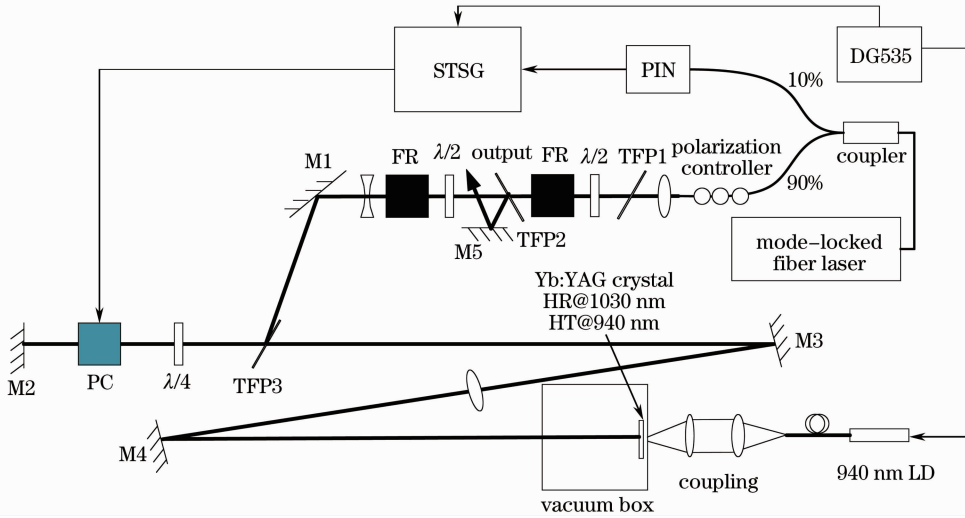


图 2 实验装置图

Fig. 2 Experimental setup

3 实验结果与分析

种子源的输出中心波长 1030 nm, LD 抽运功率为 140 mW, 图 3 为在示波器上可以看到种子脉冲序列间隔 65.6 ns, 重复频率 15.2 MHz, 注入种子光谱宽度由 YOKOGAWA 公司生产的 AQ6370B 光谱分析仪(OSA)所测, 如图 4(a)所示, 其光谱半峰全宽(FWHM)为 8.9 nm, 脉冲宽度由德国 APE 公司生产 Pulse Check 150 自相关仪测量, 如图 5(a)所示, 自相关宽度为 25.7 ps, 去掉自相关因子 1.414, 实际种子脉冲宽度 FWHM 为 18 ps, 用空间光功率计测得平均功率为 3.8 mW, 则单脉冲能量为 250 pJ. 掺杂原子数分数为 8% 的增益介质 Yb:YAG 晶体, 工作在 -90°C 的环境下. 在 22°C 实验平台温度, PC 重复频率 10 Hz, 抽运时间为 1.5 ms 的情况下, 调节电光开关使光脉冲被放大 20 程, 得到最大 $217\ \mu\text{J}$ 的激光脉冲输出. 输出能量空间分布如图 6 所示, 光束质量因子 $M_x^2 = 1.24$, $M_y^2 = 1.18$. 实验中晶体放在束腰位置, 光强密度处于最大值, 晶体表面所镀膜层损伤阈值比较低, 继续放大就会将膜层打坏. 对于单次皮秒级短脉冲的测量, 基于单次二阶自相关原理, 将光脉冲分成倾斜相交的两束, 一起入射到 BBO 晶体上, 倍频后成像在 CCD 上, 在不同点处产生不同的时间延迟, 自制了一台自相关仪^[13], 测得输出脉宽自相关信号宽度为 7.76 ps, 对应的脉冲宽

度为 5.5 ps, 输出脉冲的光谱如图 4(b)所示, 由 OSA 测得为 0.3 nm, 再生放大器的总增益约为 10^6 . 由于再生放大器工作在未饱和状态下, 能量稳定很差, 幅值在 $100\ \mu\text{J}$ 到 $217\ \mu\text{J}$ 之间跳动. 在皮秒短脉冲被放大之前给其加入 1 ns 后缀长脉冲, 此时放大腔内脉冲可看作 1 ns 脉冲, 这样可以保证再生放大器工作在饱和状态而不受到破坏, 在能量放大之后用电光开关与 $\lambda/2$ 波片组合隔离掉后缀脉冲, 可以提高皮秒脉冲的稳定性.

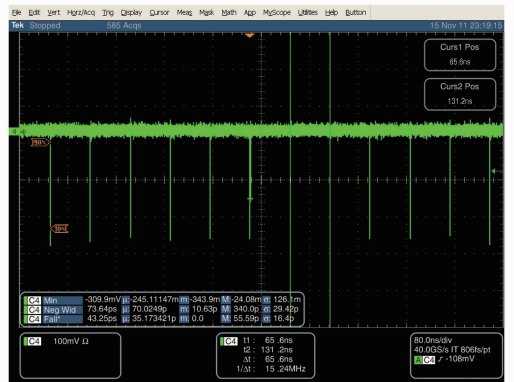


图 3 种子光时间序列

Fig. 3 Time series of seed pulses

啁啾脉冲在放大的过程中会受到增益窄化、增益饱和、色散、非线性等效应的影响, 并且增益窄化、增益饱和和非线性效应的影响会随着能量的放大越

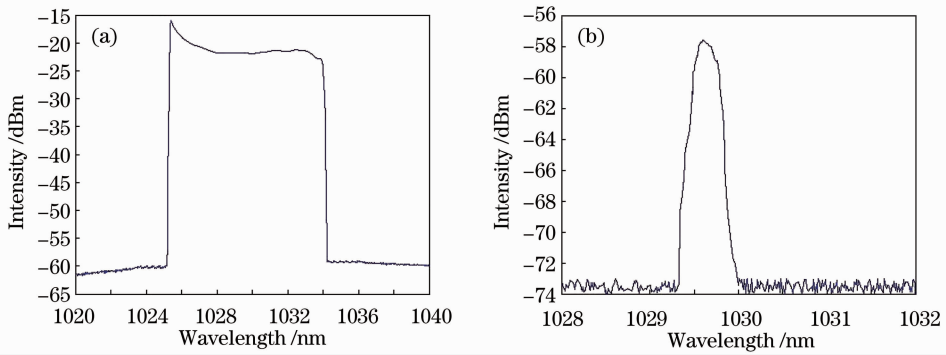


图 4 (a)种子光的光谱功率密度图;(b)经过再生放大器输出的光谱功率密度图

Fig. 4 (a) Spectrum intensity of seed light; (b) spectrum intensity of the output from regenerative amplifier

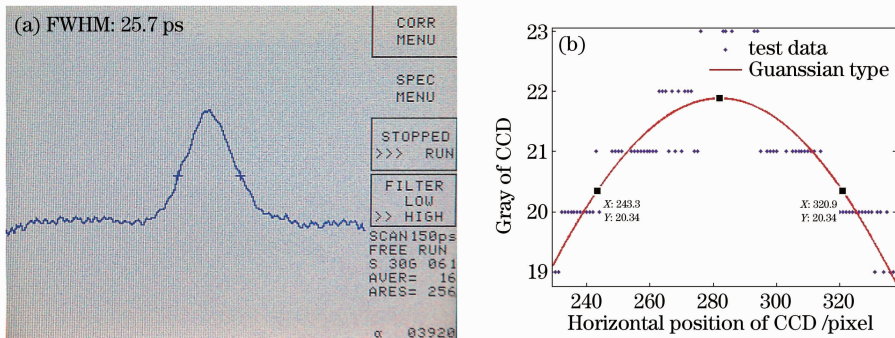


图 5 (a)种子光脉冲自相关信号宽度;(b)再生放大器输出脉冲自相关信号宽度

Fig. 5 (a) Self-correlation signal width of seed pulse; (b) self-correlation signal width of output from regenerative amplifier

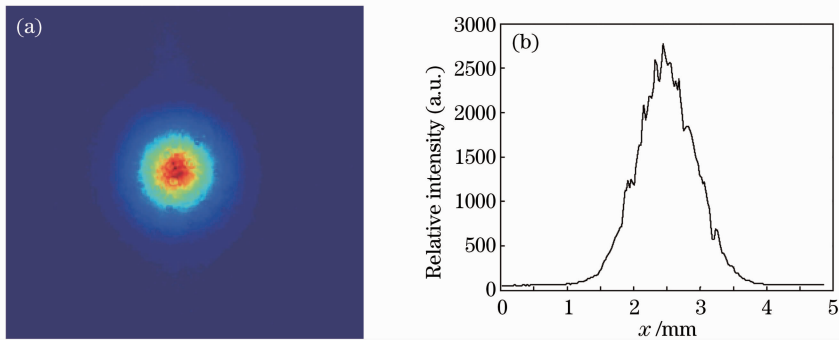


图 6 (a)输出脉冲的能量空间分布;(b)输出脉冲空间能量的一维分布

Fig. 6 (a) Spatial intensity distribution of output pulses; (b) one-dimensional spatial intensity distribution of output pulses

来越明显^[14,15]。在简单地估算再生放大器的增益窄化对啁啾脉冲放大的影响时,可以用迭代法。能量放大公式为 $I_n = I_0 G^n$, 其中, n 为放大程数, I_0 为注入光脉冲能量, I_n 为 n 程放大后的输出脉冲能量, G 为单程增益, 即可得出输出脉冲的能量值。Yb:YAG 晶体在常温下的增益谱线为 10 nm, 而在 $-90\text{ }^\circ\text{C}$ 的低温环境下只有 1.7 nm^[16], 模型中 G 为高斯型函数, I_0 为一方波, 则如图 7 所示。

由图 7 也可以很明显的看出再生放大器的增益窄化对宽谱光放大的影响, 模拟中输出光脉冲的谱宽

为 0.4 nm, 根据不确定关系, 高斯型脉冲 $\Delta\nu\Delta t \geq 0.441$, 脉宽为 4.2 ps, 这一结果与实验中测得的 0.3 nm, 5.5 ps 相吻合。可见, 由于增益窄化效应, 偏离发射主峰的光谱由于增益远小于发射主峰对应的光谱, 在再生放大器中经过多程放大之后相比主峰越来越小, 对于宽谱啁啾脉冲来说, 当谱宽减小到一定程度, 满足傅里叶变换极限脉冲时, 根据测不准原理, 脉冲宽度与光谱宽度成反比。实验中光谱窄化到原来的 0.079, 达到了参量放大对光谱宽度的要求, 同时时间宽度被压缩到 5.5 ps, 参量荧光可以

被有效抑制在抽运时间窗口内。

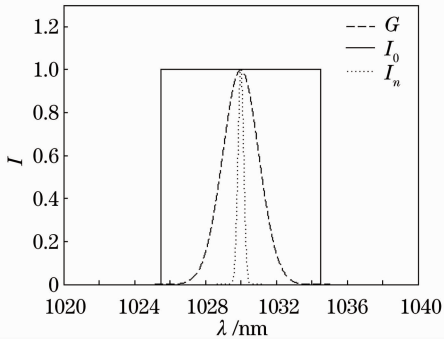


图7 种子光经过再生放大器输出的归一化能量谱图

Fig. 7 Normalized energy spectrum of output from regenerative amplifier

4 结 论

通过由液氮制冷工作在 $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的Yb:YAG再生放大器的放大,将锁模光纤激光器输出的15.2 MHz,单脉冲能量250 pJ的光脉冲序列选单为10 Hz并放大到217 μJ ,在接近 10^6 增益的同时,将谱宽8.9 nm,脉宽18 ps的种子光窄化到谱宽0.3 nm,脉宽5.5 ps的光脉冲输出,光谱窄化为原来的0.079,可以作为一个非常好的抽运源将OPCPA的参量过程中的参量荧光抑制在皮秒的时间窗口内,从而提高OPCPA的信噪比。而随着温度的进一步降低,Yb:YAG晶体的热导率会相应地提升,发射截面也会更大,从而可以制作出更高重复频率、抽运能力更大的OPCPA系统,为研究惯性约束聚变快点火、背光探针以及次级辐射的抽运技术提供新的实验平台。

参 考 文 献

- 1 C. Dorrer, I. A. Begishev, A. V. Okishev *et al.*. High-contrast optical-parametric amplifier as a front end of high-power laser systems[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(15): 2143~2145
- 2 Zeng Shuguang, Zhang Bin, Li Xianhua *et al.*. A new method using chirp-matching OPCPA scheme for improving signal-to-noise ratio of ultrashort laser pulse[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0719001
- 曾曙光, 张 彬, 李现华等. 提升超短脉冲激光信噪比的啁啾匹配光参量啁啾脉冲放大新方法[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0719001
- 3 I. N. Ross, P. Matousek, G. H. C. New *et al.*. Analysis and optimization of optical parametric chirped pulse amplification[J]. *Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics*, 2002, **19**(12): 2945~2956

- 4 Wang Yanhai. Engineering Design Research on OPCPA for the Front End of Picosecond-Petawatt-Class Lasers[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2009. 45~61
- 王艳海. 皮秒拍瓦前端OPCPA的工程设计研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2009. 45~61
- 5 I. Musgrave, W. Shaikh, M. Galimberti *et al.*. Picosecond optical parametric chirped pulse amplifier as a preamplifier to generate high-energy seed pulses for contrast enhancement[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(33): 6558~6562
- 6 D. C. Brown. The promise of cryogenic solid-state lasers[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2005, **11**(3): 587~599
- 7 Y. Akahane, M. Aoyama, K. Ogawa *et al.*. High-energy, diode-pumped, picosecond Yb:YAG chirped-pulse regenerative amplifier for pumping optical parametric chirped-pulse amplification[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(13): 1899~1901
- 8 Jiang Xinying, Zheng Jianguang, Yan Xiongwei *et al.*. Theoretical research on amplification properties of cryogenic Yb:YAG amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(s1): s100211
- 蒋新颖, 郑建刚, 严雄伟等. 低温Yb:YAG放大器放大特性理论研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(s1): s100211
- 9 Wang Jianlei, Shi Xiangchun, Zhu Xiaolei. Optimization design and modeling of high peak power Yb:YAG pulsed lasers with high efficiency [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2278~2283
- 王建磊, 施翔春, 朱小磊. 高效率高功率脉冲Yb:YAG片状激光器优化设计与模拟[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2278~2283
- 10 Duan Wentao, Jiang Xinying, Jiang Dongbin *et al.*. 10 Hz joule-class laser diode end-pumped V-shaped water-cooled Yb:YAG oscillator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 44~48
- 段文涛, 蒋新颖, 蒋东宾等. 激光二极管端面抽运的焦耳级10 Hz“V”型水冷Yb:YAG激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 44~48
- 11 Li Xiang, Wang Jianguang, Li Xuechun *et al.*. Laser diode pumped cryogenic cooled Yb:YAG regenerative amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(11): 1102010
- 李 响, 王江峰, 李学春等. 激光二极管抽运低温Yb:YAG再生放大器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(11): 1102010
- 12 Panzheng Zhang, Wei Fan, Xiaochao Wang *et al.*. Generation of 8.5-nJ pulse from all-fiber dispersion compensation-free Yb-doped laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(8): 768~770
- 13 Ouyang Xiaopin, Yang Lin, Pen Yonghua *et al.*. Research on precise diagnostics for pico-second single shot pulse[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(4): 0408003
- 欧阳小平, 杨 琳, 彭永华等. 皮秒自相关仪的性能测试研究[J]. *中国激光*, 2012, **39**(4): 0408003
- 14 Cao Dongmao, Wei Zhiyi, Teng Hao *et al.*. Control the gain-narrowing in femtosecond Ti:sapphire amplifier by shaping oscillator pulse [J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, **49**(6): 1202~1205
- 曹东茂, 魏志义, 滕 浩等. 整形种子脉冲克服放大过程中增益窄化效应的研究[J]. *物理学报*, 2000, **49**(6): 1202~1205
- 15 Chu Xiaoliang, Zhang Bin, Cai Bangwei *et al.*. Study of the multipass amplification of the chirped pulse and its inverse problem[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(10): 4696~4700
- 楚晓亮, 张 彬, 蔡邦维等. 啁啾脉冲多程放大及其逆问题的研究[J]. *物理学报*, 2005, **54**(10): 4696~4700
- 16 D. A. Rand, S. E. J. Shaw, J. R. Ochoa *et al.*. Picosecond pulses from a cryogenically cooled, composite amplifier using Yb:YAG and Yb:GSAG[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(3): 340~342