

doi:10.3788/gzxb20184709.0914002

皮秒激光泵浦的亚 10 fs 钛宝石激光器

何会军^{1,2}, 蒋建旺³, 程梦尧³, 宋贾俊^{1,2}, 王兆华¹, 方少波¹, 魏志义^{1,2}

(1 中国科学院物理研究所 北京凝聚态物理国家研究中心, 北京 100190)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 西安 710126)

摘 要: 研制了高稳定 Nd:YVO₄ 皮秒激光振荡器, 并在 15 W、808 nm 激光泵浦下得到 6 W 的连续锁模皮秒激光输出, 光-光效率为 40%。对该皮秒激光进行单通放大后得到 14 W 的基频光输出, 倍频后可以得到 7 W 的 532 nm 皮秒激光, 用作钛宝石振荡器的泵浦源。在 4.5 W 的皮秒 532 nm 激光泵浦下, 结合腔外压缩, 得到了脉宽为 9.4 fs、平均功率为 150 mW 的脉冲序列输出。调节钛宝石振荡器的腔长使其与皮秒振荡器的腔长一致时, 可实现自触发克尔透镜锁模。实验结果表明皮秒激光泵浦可以有效地触发钛宝石激光器的自动锁模, 输出飞秒脉冲序列。

关键词: 超快激光; 皮秒激光振荡器; 钛宝石飞秒激光器; 克尔透镜锁模

中图分类号: TN248

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)09-0914002-6

Sub-10-fs Ti : sapphire Oscillator Pumped by Picosecond Laser

HE Hui-jun^{1,2}, JIANG Jian-wang³, CHENG Meng-yao³, SONG Jia-jun^{1,2},
WANG Zhao-hua¹, FANG Shao-bo¹, WEI Zhi-yi^{1,2}

(1 *Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

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

(3 *School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710126, China*)

Abstract: A high-power Nd:YVO₄ picosecond laser was developed, and the continuously mode-locking with output power of 6 W was realized under 15 W 808 nm pump power, corresponding to optical-to-optical conversion efficiency of 40%. The picosecond laser was amplified to 14 W by a single segment amplifier stage. After frequency multiplication, 7 W picosecond laser was obtained, serving as pump source of Ti : sapphire oscillator. Being pumped by 4.5 W 532 nm picosecond laser, the pulse trains output with pulse duration compressed to 9.4 fs and average power of 150 mW was obtained. By tuning the cavity length of the Ti:sapphire oscillator to decrease the difference between the two oscillators' cavity length, self-initiating Kerr-lens mode-locking was realized. The result shows that the picosecond laser pumping could trigger the Ti : sapphire oscillator mode-locking and output femtosecond pulse trains.

Key words: Ultrafast laser; Picosecond laser oscillator; Ti : sapphire femtosecond oscillator; Kerr-lens modelocking

OCIS Codes: 140.7090; 140.5680; 320.7090; 320.7160; 320.7120

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(Nos.XDB16030200, XDB23030203), 中国科学院前沿科学重点研究计划(Nos.KJZD-EW-L11-03, YZDJ-SSW-JSC006), 国家重点研发计划(No.2017YFC0110301), 国家自然科学基金(Nos.11434016, 61575219)和中国科学院青年创新促进会(No.2018007)资助

第一作者: 何会军(1992-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为超快激光放大技术. Email: hjhe@iphy.ac.cn

通讯作者: 王兆华(1977-), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为超快激光放大与新型全固态激光技术. Email: zhwang@iphy.ac.cn

导 师: 魏志义(1963-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为超短脉冲激光与精密测量. Email: zywei@iphy.ac.cn

收稿日期: 2018-03-28; **录用日期:** 2018-05-29

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

20世纪90年代以来,克尔透镜锁模(Kerr Lens Modelocking, KLM)效应的发现^[1]和应用使飞秒激光器可以直接输出亚10 fs的脉冲.钛宝石晶体作为一种拥有高损伤阈值、超宽发射光谱范围^[2]的克尔透镜介质备受关注.随着全固态激光的发展,基于二极管泵浦的Nd:YVO₄晶体产生的激光经过腔内倍频能得到高功率、高稳定性的532 nm激光输出,成为目前最常采用的钛宝石振荡器的泵浦源.钛宝石振荡器实现KLM运行需要泵浦光源具有稳定性高、光束质量优异等特点,这样的泵浦源制造技术目前只有国外少数几家公司掌握,并且价格不菲,占据了整套飞秒钛宝石振荡器一半以上的成本,因此限制了这类激光在经费有限的普通实验室及工业医疗等领域的推广应用.

近年来,蓝光二极管激光的出现和发展为钛宝石激光提供了新的泵浦方案.美国科罗拉多大学的研究人员将单管功率瓦量级的蓝光二极管输出的445 nm激光直接耦合到钛宝石晶体中,实现了30 mW、15 fs的锁模激光输出^[3].但由于二极管的输出激光光束质量差,聚焦在钛宝石晶体中的光斑达不到连续绿光的聚焦大小(10 μm左右),445 nm的泵浦波长也不是钛宝石晶体的吸收峰,克尔透镜效应较弱且腔型调节不易,因此很难达到连续绿光泵浦产生的超宽带乃至倍频程光谱输出^[4].针对该问题,于子蛟等提出了488 nm光纤激光泵浦的KLM钛宝石激光器,由于该波长正好处于钛宝石晶体的吸收峰且光纤激光具有优良的聚焦效果,因此得到了高效率的亚10 fs脉冲输出^[5].但目前488 nm光纤激光的输出功率有限,限制了锁模平均功率的进一步提高.

全固态皮秒倍频激光可作为钛宝石激光的泵浦源,其具有锁模自启动的优点,并可用于研究KLM的建立过程,是另一类锁模泵浦方式.由于锁模激光容易得到高光束质量的激光输出($M^2 \sim 1.1$),由其泵浦钛宝石振荡器是一种实用而又理想的方案,并可实现超宽带的光谱输出^[6].国内在钛宝石飞秒激光的产生和放大方面有非常多的报道,基于国产啁啾镜能够从钛宝石激光振荡器产生亚8 fs脉冲,作为种子用于钛宝石飞秒激光放大器的研究^[7-10],但这些实验中钛宝石振荡器的泵浦源多采用的是进口的连续532 nm泵浦源.本文研究了基于Nd:YVO₄的高功率皮秒激光振荡器及其泵浦钛宝石飞秒激光振荡器,将所研制的皮秒振荡器输出的6 W、72.6 MHz脉冲序列经过一级放大后,激光功率提升到了14 W.经过倍频得到了7 W的皮秒绿光,作为钛宝石激光振荡器的泵浦源.实验中当钛宝石振荡器工作在锁模区时,调整其腔长与皮秒振荡器的腔长一致时,能够自动触发克尔透镜锁模运行,得到亚10 fs脉冲产生的结果.

1 高功率皮秒振荡器

对于振荡器而言,出光阈值和光-光效率是评价其特征的重要参数.实验中,为了得到较高光-光效率的皮秒激光运行,使用端面泵浦的方式,优化了输出光束质量,保证激光晶体中泵浦光与激光在空间上有较好的耦合,进而实现高光束质量、高效率输出.晶体采用Nd:YVO₄晶体,该晶体发射截面较大,具有较低的出光阈值和较高的光-光效率^[11].

皮秒振荡器的光路如图1所示.泵浦光使用光纤耦合输出的激光二极管,输出中心波长为808 nm,光纤芯径为200 μm,NA为0.22.经过透镜耦合系统,将泵浦光聚焦到晶体中心.晶体长度为5 mm,掺杂浓度为0.5 at%.计算可得晶体的吸收系数为8.336 cm⁻¹,单程吸收率约为98%.晶体两侧的M₁和M₂的曲率半径分别为500 mm和300 mm,M₃的曲率半径为500 mm,将激光聚焦到可饱和吸收体上.

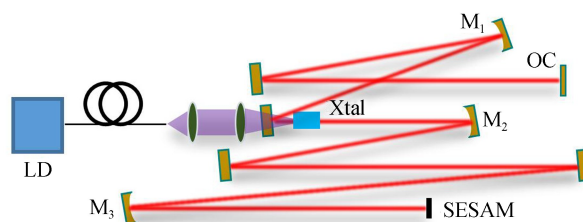


图1 皮秒振荡器实验光路

Fig.1 Experiment layout of picosecond oscillator

在端面泵浦的振荡器中,为了使得振荡器出光阈值低且具有较高的光-光转换效率,需要根据泵浦光和

晶体的参数合适地选择在激光晶体处泵浦光斑和腔内振荡激光光斑的尺寸,LAPORTA P 等建立了基模光斑传输的速率方程^[12].假设泵浦光的光强分布为圆高斯型^[13],则根据文献[14],最优化的泵浦光斑聚焦位置和聚焦光斑大小的公式为

$$z_{o,opt} = \ln(2)/\alpha \quad (1)$$

$$\omega_{po,opt} = \sqrt{C\alpha/n\ln(2)} \quad (2)$$

式中, $z_{o,opt}$ 为泵光在晶体中的最佳聚焦位置(晶体前表面处的值为 0), $\omega_{po,opt}$ 为泵浦光最佳聚焦光斑腰斑尺寸, α 为晶体的吸收系数, n 为晶体折射率,常数 $C = n\theta\omega$,表征光纤耦合输出的泵光光束质量, ω 为激光腰斑半径, θ 为激光远场发散角.

可以计算得到实验中使用的泵浦光应该聚焦到晶体内部距离表面 0.8 mm 处,聚焦腰斑半径为 192 μm ,实际中使用 1 : 2 的耦合比例,将泵浦光聚焦到晶体上,聚焦光斑半径约为 200 μm .为了保证泵浦激光与腔内振荡激光有较好的空间耦合^[15],优化腔内各元件的间距,使得在晶体处腔内激光光斑半径为 180 μm .实验中在 0.5 W 的泵浦下出光,在 15 W 的泵浦功率下输出 6 W 的皮秒脉冲锁模序列,光-光转换效率为 40%.振荡器输出功率随着泵浦功率的变化曲线如图 2 所示.使用强度自相关仪测量皮秒振荡器的输出脉宽,测量得到的自相关曲线如图 3 所示.使用 sech^2 型函数拟合,可以得到输出的脉宽为 23 ps.

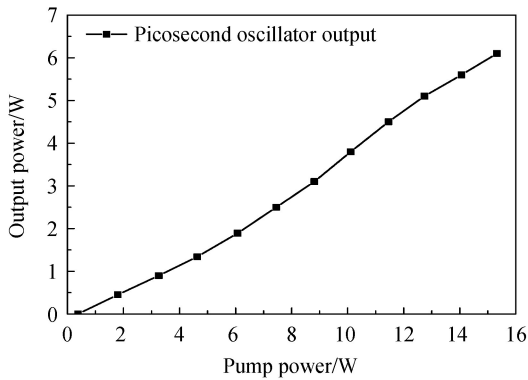


图 2 皮秒振荡器输出功率曲线

Fig.2 Output power of picosecond oscillator

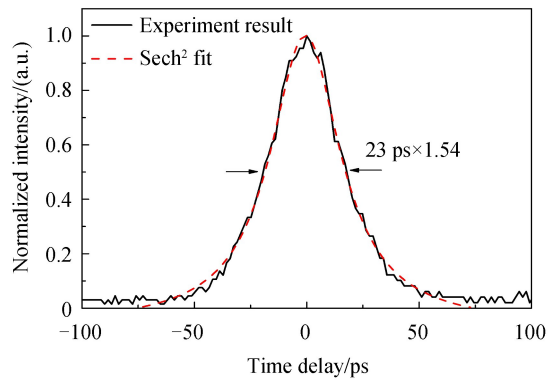


图 3 皮秒振荡器输出脉宽的自相关曲线

Fig.3 Self-correlation curve of pulse duration measurement of picosecond oscillator

为了得到较高的泵浦光功率,将皮秒振荡器的输出经过一级放大,放大到 14 W,经过倍频得到最大 7 W 的 532 nm 激光输出.如图 4,输出的激光光斑为高斯分布,测量得到输出激光的 M^2 为 1.1,可以有效地作为钛宝石振荡器的泵浦源.

Waist Loc X 1462.30
 Waist Loc Y 861.03
 $M^2 X$ 1.103
 $M^2 Y$ 1.103
 BPP X 1.869×10^{-7}
 BPP Y 1.867×10^{-7}

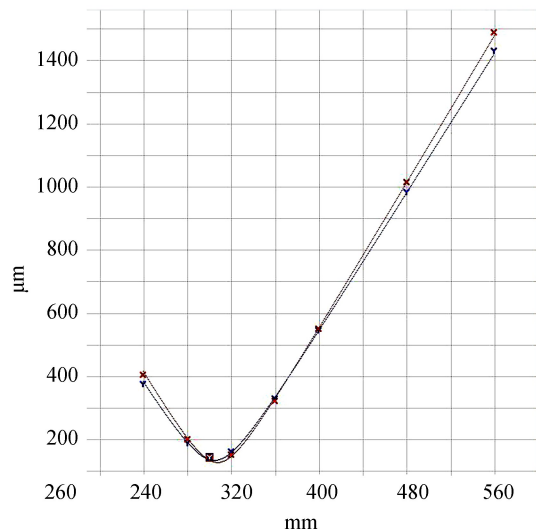
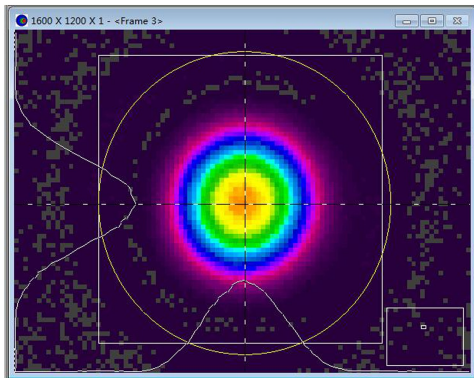


图 4 皮秒绿光激光的聚焦光斑和 M^2 因子测量结果

Fig.4 The profile of the focused laser beam and M^2 measurement results of picosecond green laser

测量了该皮秒绿光激光输出的稳定性,其输出 6.5 W 时,在 10 h 内的功率稳定性曲线如图 5 所示,输出激光功率的 RMS 相对误差为 0.4%.稳定的输出为后续开展泵浦钛宝石振荡器的实验打好了基础.

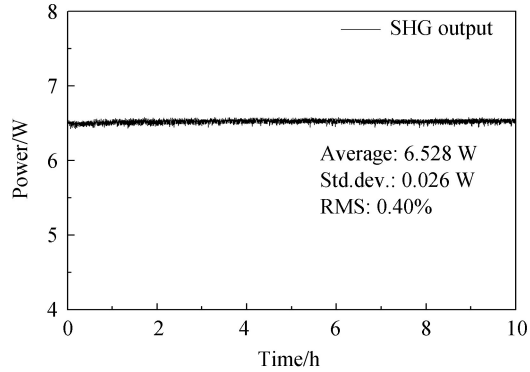
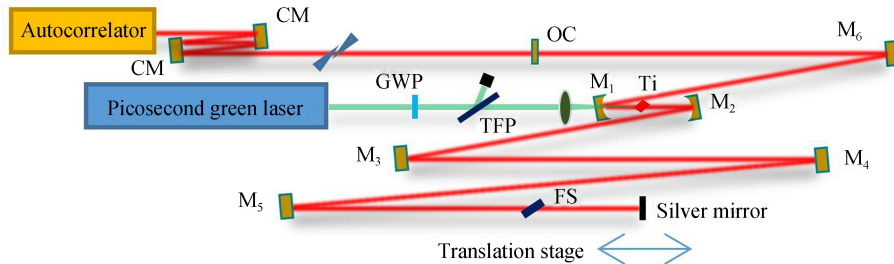


图 5 皮秒绿光激光的输出功率的稳定性测量结果

Fig.5 Measurement result of output power stability of the picosecond green laser

2 皮秒激光泵浦钛宝石振荡器

基于自建的皮秒 532 nm 激光,开展了皮秒激光泵浦钛宝石振荡器的实验,实验光路如图 6 所示.将皮秒激光倍频后得到的 532 nm 激光注入钛宝石振荡器中,使用半波片和薄膜偏振片控制注入泵光功率.腔内端镜安置在电动平移台上,用于调节振荡器腔长.输出激光经过一对尖劈和一对啾啉镜补偿色散后导入干涉自相关仪,测量输出脉宽.



HWP: half-wave plate; TFP: thin-film polarizer; OC: output coupler; M_1, M_2 : concave chirped mirrors; M_3-M_6, CM : plane chirped mirrors, FS: fused silica

图 6 皮秒激光泵浦钛宝石振荡器实验示意图

Fig.6 Experimental layout of Ti:sapphire oscillator pumped by picosecond laser

实验中,钛宝石振荡器使用全啾啉镜的方式补偿色散,钛宝石晶体厚度为 2 mm,插入 3.5 mm 的熔石英进行色散补偿,腔内的各部分元件引入的色散量如图 7 所示.最终腔内的净色散量为 -50 fs^2 左右,在负色散与自相位调制效应相互作用之下,实现了孤子传输^[16],有利于振荡器输出最短的脉宽^[17].

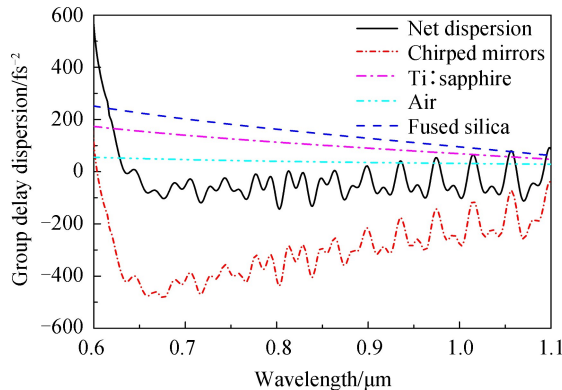


图 7 钛宝石振荡器腔内元件提供的群延迟色散曲线

Fig.7 Group delay dispersion curve of different materials inside the Ti:sapphire oscillator

通过调节腔内凹面镜相对于晶体的位置,可以使钛宝石振荡器工作在锁模区,此时通过推动腔内的平移台,可以启动克尔透镜锁模,输出飞秒脉冲序列.但此时钛宝石振荡器与皮秒振荡器的腔长不匹配,一旦失掉锁模,则需要再次推动平移台才能启动锁模,该情形与连续绿光泵浦钛宝石激光振荡器一致.

调整钛宝石振荡器的腔长,使得两个振荡器的腔长一致(腔长差在 $\pm 10 \mu\text{m}$ 之内),可以实现自动触发克尔透镜锁模的效果.通过遮挡泵浦光或者遮挡钛宝石振荡器腔内激光打掉锁模,撤去遮挡物后钛宝石振荡器可以自动触发克尔透镜锁模.更进一步,将皮秒激光关掉,再次开机时皮秒绿光泵浦会触发钛宝石振荡器自动启动克尔透镜锁模,输出飞秒脉冲序列.该过程表明,使用皮秒激光泵浦钛宝石飞秒振荡器,可以省略掉推动平移台或启动声光调制器来启动锁模的步骤,自动触发克尔透镜锁模,提升系统的稳定性和操作的便捷性.

在4.5 W的绿光泵浦下,分别使用透射率为10%和3%的输出镜进行实验,得到了410 mW和150 mW的飞秒激光输出,其输出光谱如图8所示.在使用3%透射率的输出镜时,测量振荡器输出脉冲的脉宽.使用一对啁啾量为 -40 fs^2 的啁啾镜对输出激光补偿色散,在这对镜子上往返反射两次后,进入干涉自相关仪,调整尖劈的插入量微调色散量.经过优化,测量到输出脉宽为9.4 fs,其干涉自相关曲线如图9所示.

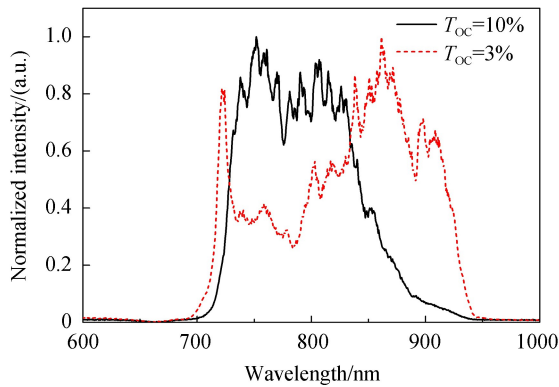


图8 钛宝石振荡器自动触发锁模后输出光谱
Fig.8 Output spectrum of the Ti:sapphire oscillator when self-starting modelocking was initiated

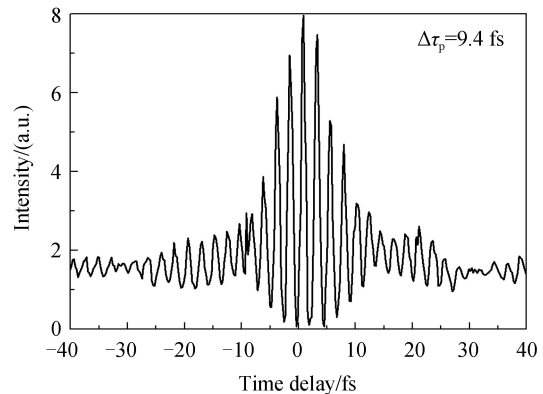


图9 经过腔外色散补偿的脉冲宽度测量结果
Fig.9 Pulse duration measurement result of the output pulses after dispersion compensation

3 结论

本文研制了高功率皮秒振荡器,在15 W的二极管泵浦功率下,振荡器输出6 W的皮秒脉冲序列.对皮秒激光进行放大和倍频后,得到7 W的皮秒绿光.使用该皮秒绿光泵浦钛宝石振荡器,得到了150 mW、9.4 fs、72.6 MHz的飞秒脉冲输出.实验中钛宝石振荡器腔长与皮秒振荡器腔长一致时,能够实现自触发克尔透镜锁模,打掉锁模后能观察到钛宝石振荡器自动启动克尔透镜锁模、输出飞秒脉冲序列的现象.实验表明,皮秒锁模激光可以作为钛宝石飞秒激光振荡器的一种理想的泵浦方式.

参考文献

- [1] SPENCE D E, KEAN P N, SIBBETT W. 60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser[J]. *Optics Letters*, 1991, **16**(1): 42-44.
- [2] MOULTON P F. Spectroscopic and laser characteristics of Ti:Al₂O₃[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1986, **3**(1): 125-133.
- [3] DURFEE C G, STORZ T, GARLICK J, et al. Direct diode-pumped Kerr-lens mode-locked Ti:sapphire laser[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(13): 13677-13683.
- [4] ELL R, MORGNER U, K RTNER F X, et al. Generation of 5-fs pulses and octave-spanning spectra directly from a Ti:sapphire laser[J]. *Optics Letters*, 2001, **26**(6): 373-375.
- [5] YU Z, HAN H, ZHANG L, et al. Low-threshold sub-10 fs mode-locked Ti:sapphire laser pumped by 488 nm fiber laser[J]. *Applied Physics Express*, 2014, **7**(10): 102702.
- [6] ELL R, ANGELOW G, SEITZ W, et al. Quasi-synchronous pumping of modelocked few-cycle Titanium Sapphire lasers[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(23): 9292-9298.
- [7] SHEN Zhong-wei, WANG Zhao-hua, FAN Hai-tao, et al. A 4 mJ femtosecond Ti:sapphire regenerative amplifier at 1 kHz repetition rate[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **63**(10): 104211

- 沈忠伟, 王兆华, 范海涛, 等. 输出能量 4 mJ 的 1kHz 飞秒掺钛蓝宝石激光再生放大研究[J]. 物理学报, 2014, **63**(10): 104211.
- [8] FAN Hai-tao, WANG Yan-zhi, WANG Zhao-hua, *et al.* All chirped mirrors long-term stable sub-8 fs Ti:sapphire oscillator[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **64**(14): 144204
范海涛, 王胭脂, 王兆华, 等. 全啁啾镜色散补偿的亚 8 fs 钛宝石激光器[J]. 物理学报, 2015, **64**(14): 144204.
- [9] HE Peng, TENG Hao, ZHANG Ning-hua, *et al.* A cavity mode size adjustable high average power Ti:sapphire femtosecond regenerative amplifier[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, **65**(24): 244201
何鹏, 滕浩, 张宁华, 等. 腔模可调的高平均功率飞秒激光再生放大器[J]. 物理学报, 2016, **65**(24): 244201.
- [10] 赵研英, 王鹏, 张炜, 等. 采用啁啾反射镜色散补偿的 7 fs 掺钛蓝宝石激光振荡器[J]. 中国科学, 2007, **37**(1): 123-128.
- [11] XU Xin-rui, FAN Rong-wei, CHEN Zhao-dong, *et al.* 1.35 GHz linearly tunable single-frequency Nd:YVO₄ laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(11): 1105001.
徐新瑞, 樊荣伟, 陈兆东, 等. 1.35 GHz 线性调频 Nd:YVO₄ 激光器[J]. 红外与激光工程, 2016, **45**(11): 1105001.
- [12] LAPORTA P, BRUSSARD M. Design criteria for mode size optimization in diode-pumped solid-state lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1991, **27**(10): 2319-2326.
- [13] MUKHOPADHYAY P K, RANGANATHAN K, GEORGE J, *et al.* 1.6 W of TEM₀₀ cw output at 1.06 μ m from Nd: CNGG laser end-pumped by a fiber-coupled diode laser array[J]. *Optics & Laser Technology*, 2003, **35**(3): 173-180.
- [14] CHEN Y F, KAO C F, WANG S C. Analytical model for the design of fiber-coupled laser-diode end-pumped lasers[J]. *Optics Communications*, 1997, **133**(1): 517-524.
- [15] YAN X, LIU Q, WANG D, *et al.* Combined guiding effect in the end-pumped laser resonator[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(7): 6883-6902.
- [16] KRAUSZ F, FERMANN M E, BRABEC T, *et al.* Femtosecond solid-state lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1992, **28**(10): 2097-2122.
- [17] HAUS H A, FUJIMOTO J G, IPPEN E P. Structures for additive pulse mode locking[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1991, **8**(10): 2068-2076.

Foundation item: The Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (Nos. XDB16030200, XDB16030203), the Key Research Program of Frontier Sciences of Chinese Academy of Sciences (Nos. KJZD-EW-L11-03, YZDJ-SSW-JSC006), the National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFC0110301), the National Natural Science Foundation of China (Nos. 11434016, 61575219) and the Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences (No. 2018007)

引用格式: HE Hui-jun, JIANG Jian-wang, CHENG Meng-yao, *et al.* Sub-10-fs Ti:sapphire Oscillator Pumped by Picosecond Laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(9): 0914002

何会军, 蒋建旺, 程梦尧, 等. 皮秒激光泵浦的亚 10 fs 钛宝石激光器[J]. 光子学报, 2018, **47**(9): 0914002