

高功率、高效率调 Q 绿光抽运的钛宝石宽 调谐纳秒脉冲激光

李隆普^{1,2,3}, 李玉娇^{1,2,3}, 宋艳洁^{1,2,3}, 张申金^{2*}, 宗楠^{2**}, 王志敏², 薄勇^{1,2}, 彭钦军¹, 许祖彦^{1,2}

¹中国科学院理化技术研究所固体激光重点实验室, 北京 100190;

²中国科学院理化技术研究所功能晶体与激光技术重点实验室, 北京 100190;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 自行研制出钛宝石晶体抽运的波长为 532 nm 的全固态高功率激光器, 实现了高功率、高转换效率的可调谐钛宝石激光输出。使用 3 列重复频率为 1 kHz 的激光二极管阵列对称式抽运 Nd:YAG 晶体, 通过调 Q 及腔内倍频, 获得功率为 37.8 W、波长为 532 nm 的抽运光, 每个激光二极管的抽运脉冲包络内包含 5 个调 Q 脉冲, 单脉冲宽度为 90 ns, 重复频率为 5 kHz。采用该绿光抽运钛宝石晶体, 获得 733.5~871.1 nm 波长范围内的连续调谐激光, 在 771 nm 处获得的输出功率最大, 为 8.26 W, 光-光转换效率高达 42%, 脉冲宽度为 14 ns, 30 min 内输出功率稳定性优于 ±4.4%。

关键词 非线性光学; 激光技术; 钛宝石激光器; 准连续; 全固态; 高效率

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0508018

High-Power and High-Efficiency Widely Tunable Ti:sapphire Nanosecond pulsed Laser Pumped by Q-Switched Green Laser

Li Longpu^{1,2,3}, Li Yujiao^{1,2,3}, Song Yanjie^{1,2,3}, Zhang Shenjin^{2*}, Zong Nan^{2**},
Wang Zhimin², Bo Yong^{1,2}, Peng Qinjun¹, Xu Zuyan^{1,2}

¹Key Laboratory of Solid State Laser, Technical Institute of Physics and Chemistry,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

²Key Laboratory of Functional Crystals and Laser Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Herein, an all-solid-state widely tunable Ti:sapphire laser pumped by a home-made 532 nm laser with high power and high conversion efficiency is demonstrated. First, a maximum output power of 37.8 W at 532 nm is obtained by Q-switching and intracavity frequency doubling via a Nd:YAG crystal that is symmetrically pumped by three 1 kHz laser diode (LD) arrays. The envelope of each LD pulse contains five Q-switched pulses with a duration of 90 ns and repetition rate of 5 kHz. Using the green light to pump the Ti:sapphire crystal, a 733.5-871.1 nm widely tunable laser is then obtained. The maximum output power at 771 nm is 8.26 W, the optical-optical conversion efficiency is 42%, and the pulse duration is 14 ns. Moreover, the output power stability is superior to ±4.4% within 30 min.

Key words nonlinear optics; laser technique; Ti:sapphire laser; quasi-continuous; all-solid-state; high efficiency

OCIS codes 140.3590; 140.3540; 140.3580

收稿日期: 2019-01-22; 修回日期: 2019-02-20; 录用日期: 2019-02-25

基金项目: 国家重点研发项目(2016YFB0402103)、国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2012-2)、国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ120048)、国家自然科学基金重点项目(61535013)、中科院关键技术团队项目(GJJSTD20180004)

* E-mail: zhangshenjin@163.com; ** E-mail: zongnan@mail.ipc.ac.cn

1 引 言

钛宝石($\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$)晶体是目前应用最广泛、使用技术最成熟的宽调谐与超短脉冲激光增益介质,具有较宽的吸收谱和荧光谱(660~1178 nm)、较大的发射截面、优良的物化性质。全固态钛宝石激光器具有效率高、寿命长、光束质量高、线宽窄、易于模块化等优点,常被用于太赫兹波的激发^[1]、细胞生物与医学^[2]、原子捕获与冷却^[3]、飞秒脉冲激光产生^[4-5]等科学研究实验中。此外,利用非线性变换技术可将激光器的调谐范围进一步扩展到红外、可见光、紫外乃至深紫外波段^[6-10],在激光光谱学、光通信、信息处理、光刻技术等领域有着非常重要的应用^[11-13]。

目前,国内外一般使用连续激光二极管(LD)抽运、调Q及倍频产生的绿光作为钛宝石的抽运源,得到 ns 量级的钛宝石可调谐激光输出。1991年, Malcolm 等^[14]使用连续 LD 抽运调Q腔内倍频的 Nd:YLF 激光器抽运钛宝石,得到激光的波长调谐范围为 746~838 nm,单脉冲能量为 1.3 μJ ,脉冲宽度为 400 ns,这是国际上首次报道的全固态钛宝石激光器。2007年, Imahoko 等^[15]采用连续 LD 抽运 Yb:YAG 薄盘、调Q及腔内倍频获得频率为 100 kHz、功率为 86 W 的绿光;采用相同的方法抽运钛宝石时,得到绿光的功率为 16 W,脉冲宽度为 40 ns,转换效率为 20.2%。2013年, Wagner 等^[16]使用一台全固态钛宝石激光器完成对差分吸收气体分析激光雷达(DIAL)的搭建,使用一台重复频率为 250 Hz、波长为 532 nm 的全固态 Nd:YAG 激光器抽运钛宝石晶体,在 820 nm 处得到功率为 6.75 W 的激光,其转换效率为 19%。2004年,邹雷等^[17]使用连续 LD 抽运调Q腔内倍频的 Nd:YAG 激光器抽运钛宝石,获得的激光功率为 4.7 W,重复频率为 9 kHz,转换效率为 19.6%。2011年, Ding 等^[18]使用 ns 量级的绿光抽运钛宝石,得到的激光功率为 5.56 W,重复频率为 5.5 kHz,转换效率为 28.4%。2012年, Wang 等^[19]在 77 K 的低温条件下使用调Q倍频的 Nd:YLF 激光器抽运钛宝石,得到的激光功率为 16 W,重复频率为 5 kHz,脉冲宽度为 100 ns,线宽为 1 nm,转换效率为 26.7%。在上述实验中,钛宝石激光器的光-光转换效率均小于 30%。

本文研制出一台高功率、高转换效率的钛宝石激光器。采用重复频率为 1 kHz 的准连续 LD 阵列

侧面抽运 Nd:YAG 晶体,将声光调Q与 LiB_3O_5 (LBO)腔内倍频获得的脉冲绿光作为钛宝石抽运源。当钛宝石抽运绿光的吸收功率为 19.6 W 时,输出波长在 740~828 nm 宽调谐范围内的激光功率均大于 7 W;在中心波长 771 nm 处获得的输出功率最大,为 8.26 W,光-光转换效率高达 42%,测得的脉冲宽度为 14 ns,光束质量因子 $M^2=2.4$ 。

2 实验装置

全固态钛宝石激光器的实验光路如图 1 所示,激光器主要由 532 nm 抽运源与钛宝石激光系统两部分组成。在 532 nm 抽运源中, LH1 与 LH2 是两个高功率激光侧面抽运模块,每个模块均采用三向 808 nm LD 抽运结构,每个模块的抽运功率均为 240 W。LD 采用准连续运转,重复频率为 1 kHz,脉冲宽度为 160 μs 。LD 准连续运转有利于 Nd:YAG 晶体的热管理,从而获得高光束质量的抽运光,为钛宝石晶体提供优质抽运源。所使用的激光晶体为棒状 Nd:YAG 晶体,尺寸为直径 $\varphi 3\text{ mm} \times 82\text{ mm}$, Nd^{3+} 的掺杂浓度(原子数分数,下同)为 0.6%,两端均镀有 1064 nm 增透膜,以降低晶体两端的反射损耗。将两个声光调Q开关(I-QS027-5C4G-U5-ST1, Gooch & Housego, 英国)相互正交放置在 LH1 与 LH2 两侧来获得高峰值功率激光,以提高腔内激光的倍频效率。两个激光模块之间放有一块用于补偿热致双折射效应的 90°旋光晶体 QR。倍频晶体使用 II 类相位匹配的 LBO 晶体,切割方向与 Z 轴的夹角 $\theta=23.9^\circ$,与 X 轴的夹角 $\varphi=90^\circ$,尺寸为 5 mm \times 5 mm \times 20 mm。腔镜 M1 与 M3 镀有 1064 nm 高反膜, M2 为激光振荡腔输出耦合镜,总腔长为 450 mm。M4 为 55.6°入射的 532 nm 薄膜偏振片,其对水平偏振的 p 光增透,对垂直偏振的 s 光增反,因此所获得的波长为 532 nm 的钛宝石抽运光为水平偏振光。偏振片前放置一个 532 nm 半波片,调节半波片的旋转角度,获得波长为 532 nm 的最大功率线偏振激光。

在以端面抽运作为抽运方式的激光器中,抽运光与振荡光间的空间模式匹配影响着激光的输出特性,由于波长为 532 nm 的高功率激光输出模式为多模,因此采用转换效率高、模体积大、易获得单模激光模式的平平腔作为钛宝石激光器的腔型。

在钛宝石激光系统中, M6 与 M7 为腔镜,相距 145 mm,其中 M6 镀有 720~860 nm 高反膜和 532 nm 减反膜, M7 镀有 720~860 nm 部分透射膜

(透射率 $T = 10\%$)。透镜 f_1 与 f_2 的焦距分别为 500 mm 与 100 mm, 绿光通过由透镜 f_1 与 f_2 组成的准直聚焦系统耦合射入谐振腔内, 聚焦于钛宝石晶体中后方, 焦点处光斑直径为 $250 \mu\text{m}$, 可使抽运光与振荡光有更好的模式匹配, 同时能避免抽运光功率密度过大而损伤晶体前端面。为了减少钛宝石晶体的热量积累, 将用铝箔裹好的钛宝石晶体放入具有循环冷却水的紫铜热沉中, 在此情况下测得钛宝石对抽运光的吸收率为 87.5% 。通过使用色散棱镜来选择输出激光的中心波长与压窄激光线宽, M_8 与 M_9 为分光镜, 将未被钛宝石吸收的抽运光从宽调谐激光中分离。

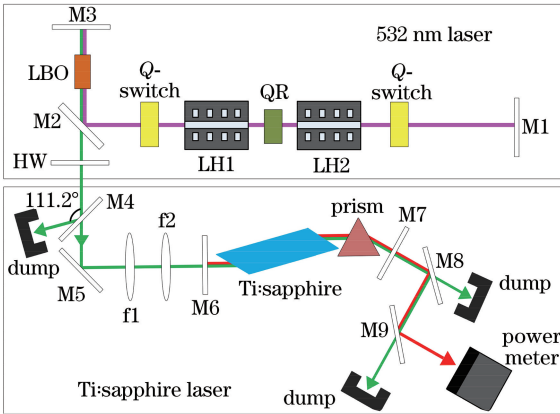


图 1 实验光路图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

3 实验结果及分析

首先, 研究 532 nm 绿光的输出功率与 LD 抽运功率的变化关系。使用功率计 (FL400A-LP1 -50, OPHIR, 以色列) 对激光功率进行测量, 并且使用光束质量分析仪 (M^2 -200, Spiricon Inc, 美国) 对绿光的光束质量进行测量, 图 2 所示为 532 nm 绿光输出功率与 LD 抽运功率的关系曲线及不同 LD 抽运功率下 532 nm 绿光的光束质量。当绿光功率为 3 W 时, 测得 532 nm 激光的光束质量较高 ($M^2 = 2.2$), 随着 LD 功率的增加, 532 nm 激光输出功率增大, 光束质量逐渐变差。当 LD 抽运功率为 225 W 时, 获得的绿光功率最大, 为 37.8 W, 相应的光束质量 $M^2 = 11.4$, 经过偏振片 M_4 后, 获得功率为 34 W 的水平偏振绿光。

声光调 Q 开关以 31.25 kHz 的频率运转, 1 kHz LD 输出脉冲包络 ($160 \mu\text{s}$) 内包含 5 个调 Q 脉冲, 使用硅光电探测器 (DET10 A, Thorlabs, 美国) 和示波器 (DPO4104, Tektronix, 中国) 对输出

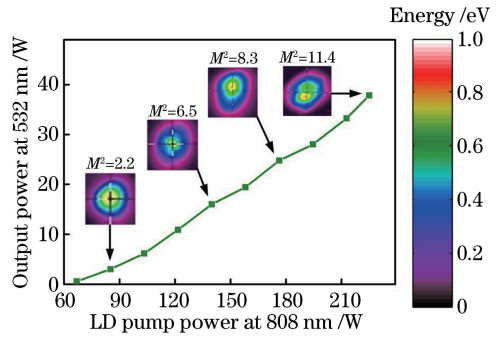


图 2 532 nm 激光输出功率随 LD 抽运功率的变化。

插图: 不同输出功率下测量的二维光束强度分布

Fig. 2 Output power of laser at 532 nm versus LD pump power. The insets are 2D beam intensity profiles measured at different output powers

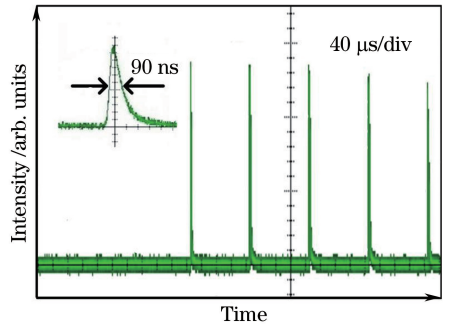


图 3 532 nm 激光脉冲串波形与单脉冲宽度

Fig. 3 Pulse train and single pulse width of 532 nm laser
绿光的脉冲波形进行测量, 测量结果如图 3 所示, 可以看到, 532 nm 绿光的单脉冲宽度为 90 ns。

图 4 所示为使用光谱仪 (Avantes, AvsSpec-2048FT-SPM, 荷兰) 测得的钛宝石激光光谱, 其可调谐波长范围为 $733.5 \sim 871.1 \text{ nm}$, 调谐宽度为 137.6 nm 。图 5 所示为测量得到的激光输出功率与输出波长的关系曲线。实验结果表明: 当输出波长的范围为 $740 \sim 828 \text{ nm}$ 时, 激光功率均大于 7 W, 并在中心波长 771 nm 处得到的激光功率最高, 为 8.26 W; 当激光波长大于 840 nm 时, 输出激光的功率明显降低, 在波长 871.1 nm 处, 输出功率降为 2 W。根据钛宝石晶体的本征性质, 室温环境下钛宝石晶体的增益峰值波长约在 785 nm 处^[20], 与本实验的结果略有不同, 这主要是因为本实验使用的输出镜 M_6 镀有 $720 \sim 860 \text{ nm}$ 部分透射膜 ($T = 10\%$), 在此透射率下中心波长为 771 nm 的激光可获得最大的输出功率。

图 6 所示为测量得到的激光波长为 771 nm 时钛宝石激光器的输出功率随波长为 532 nm 的抽运激光吸收功率的变化关系, 以及波长为 771 nm 时

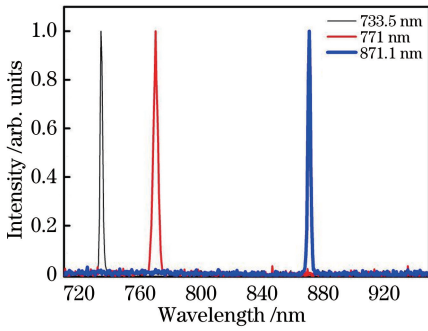


图4 钛宝石激光光谱

Fig. 4 Spectra of Ti:sapphire laser

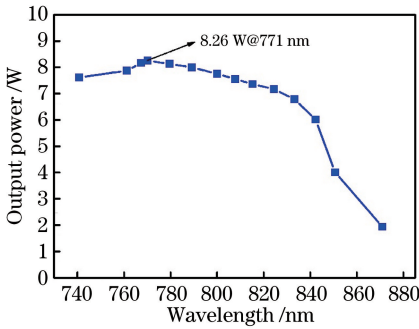


图5 钛宝石激光输出功率随波长的变化

Fig. 5 Output power of Ti:sapphire laser versus wavelength

不同输出功率下激光的二维光束强度分布。由图6可知,钛宝石激光器的功率阈值为2.6 W,当波长为532 nm的激光吸收功率为4.7 W时,获得波长为771 nm、功率为1.39 W的钛宝石激光,其光束质量 $M^2=1.1$;当钛宝石激光的输出功率由1.39 W增加到3.57 W时,激光的光束质量 M^2 变化量较小,光斑质量良好;当钛宝石绿光的吸收功率大于10 W时,钛宝石激光的光束质量 M^2 变化幅度较大,光斑质量逐渐变差,并且当抽运光的吸收功率为19.6 W时,钛宝石激光的最高输出功率为8.26 W,光-光转换效率达42%,斜率效率为49%,测得此时激光的光束质量 $M^2=2.4$,线宽约为2 nm。显然,此时钛宝石激光的光束质量较532 nm抽运光的光束质量有了较大的改善,这是增益空间窄化的结果。

由于晶体热效应严重,当钛宝石抽运绿光的吸收功率超过19.6 W时,输出功率有所下降。在最大钛宝石激光输出功率下,测量了30 min内的激光输出功率,结果图7所示,激光的脉冲宽度为14 ns,激光功率的稳定性优于 $\pm 4.4\%$ 。实验结果显示所测钛宝石激光的脉冲宽度远小于532 nm波长抽运光的脉冲宽度,一方面是由于钛宝石的增益开关现象,随着抽运能量的增大,反转粒子数所能达到的极大值增大,输出脉冲宽度变窄;另一方面是由于反转粒

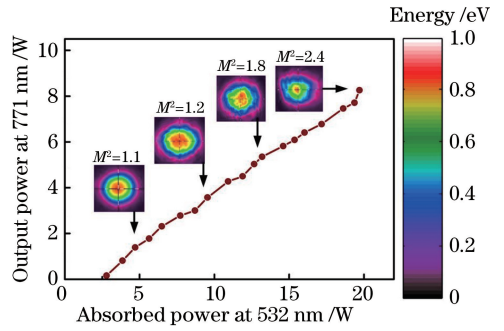


图6 771 nm 波长钛宝石激光的输出功率与532 nm 波长抽运光吸收功率的关系。插图:不同钛宝石激光输出功率下测量得到的二维光束强度分布

Fig. 6 Output power of Ti:sapphire laser at wavelength of 771 nm versus absorbed power at pump light wavelength of 532 nm. The insets are 2D beam intensity profiles measured at different output powers of Ti:sapphire laser

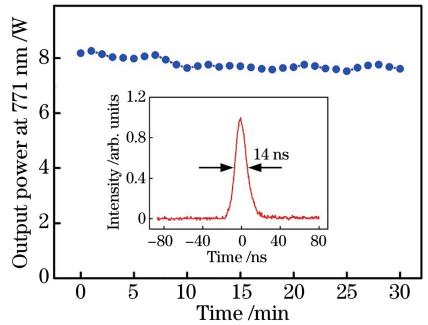


图7 771 nm 波长钛宝石激光输出功率的稳定性。

插图:771 nm 处激光单脉冲宽度

Fig. 7 Measurement of power stability of Ti:sapphire laser at 771 nm. The inset is single pulse width at 771 nm 子数密度增大,腔内光子数密度增加的速率变大,强烈受激辐射的产生时刻提前,因此钛宝石脉冲宽度的主要影响因素是抽运光的单脉冲能量,抽运光的单脉冲能量越大,则输出激光的脉冲宽度越小^[21]。

4 结 论

采用重复频率为1 kHz、脉冲宽度为160 μ s、波长为808 nm的准连续高功率LD侧面抽运模块来抽运Nd:YAG晶体,通过声光调Q和腔内LBO倍频的方法得到重复频率为5 kHz、波长为532 nm的抽运源,最大功率为37.8 W。抽运光以脉冲串形式输出,每个脉冲串包含5个由声光调Q触发形成的脉冲,单脉冲宽度为90 ns,研究了532 nm绿光抽运钛宝石激光器的输出特性。钛宝石激光输出波长范围为733.5~871.1 nm,最大调谐范围达137.6 nm,在771 nm波长处获得的输出功率最大,

为 8.26 W,光-光转换效率高达 42%,脉冲宽度为 14 ns,光束质量为 $M^2=2.4$,线宽约为 2 nm,30 min 内功率稳定性优于 $\pm 4.4\%$ 。实验表明,采用准连续侧面抽运激光模块调 Q 腔内倍频的方式得到脉冲串型输出的 532 nm 波长抽运光,并将其用于钛宝石晶体的抽运,可获得高功率、高转换效率的宽调谐激光。该装置具有结构紧凑、能量利用率高、宽调谐激光功率高、激光脉冲宽度窄等优点,可为通过非线性变换技术获得其他波段的高功率、高效率宽调谐激光提供优质基频激光源。

参 考 文 献

- [1] Stone M R, Naftaly M, Miles R E, *et al.* Generation of continuous-wave terahertz radiation using a two-mode titanium sapphire laser containing an intracavity Fabry-Perot etalon[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97(10): 103108.
- [2] Sibbett W, Lagatsky A A, Brown C T A. The development and application of femtosecond laser systems[J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 6989.
- [3] Kuwamoto T, Honda K, Takahashi Y, *et al.* Magneto-optical trapping of Yb atoms using an intercombination transition[J]. *Physical Review A*, 1999, 60(2): R745-R748.
- [4] Ell R, Morgner U, Kärtner 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] Wang X L, Hu X H, Xu P, *et al.* Ti:sapphire femtosecond pulses pumped directly by green diode lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(7): 0701002.
王向林, 胡晓鸿, 徐鹏, 等. 绿光半导体激光器直接抽运的钛宝石飞秒脉冲[J]. *中国激光*, 2017, 44(7): 0701002.
- [6] Li H J, Zhang M, Li F Q. High-power single-frequency 461 nm generation from an intracavity doubling of Ti:sapphire laser with LBO[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(3): 0302003.
李慧娟, 张森, 李凤琴. 高功率单频 LBO 腔内倍频 461 nm 钛宝石激光器[J]. *中国激光*, 2016, 43(3): 0302003.
- [7] Villa F, Chiummo A, Giacobino E, *et al.* High-efficiency blue-light generation with a ring cavity with periodically poled KTP[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2007, 24(3): 576-580.
- [8] Peng Y, Zhao Y, Li Y, *et al.* Three methods to lock the second harmonic generation for 461 nm [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(2): 345-350.
彭瑜, 赵阳, 李焯, 等. 3 种方法实现 461 nm 外腔倍频激光器的锁定[J]. *中国激光*, 2010, 37(2): 345-350.
- [9] Cruz L S, Cruz F C. External power-enhancement cavity versus intracavity frequency doubling of Ti:sapphire lasers using BIBO [J]. *Optics Express*, 2007, 15(19): 11913-11921.
- [10] Xu C, Dai S B, Guo C, *et al.* A high-pulse-energy high-beam-quality tunable Ti:sapphire laser using a prism-dispersion cavity[J]. *Chinese Physics Letters*, 2017, 34(3): 034206.
- [11] Zhao X J, Chen R P, Tengroth C, *et al.* Solid-state tunable kHz ultraviolet laser for Raman applications [J]. *Applied Spectroscopy*, 1999, 53(10): 1200-1205.
- [12] Sukanuma T, Kubo H, Wakabayashi O, *et al.* 157-nm coherent light source as an inspection tool for F₂ laser lithography[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(1): 46-48.
- [13] Kulatilaka W D, Anderson T N, Bougher T L, *et al.* Development of injection-seeded, pulsed optical parametric generator/oscillator systems for high-resolution spectroscopy [J]. *Applied Physics B*, 2005, 80(6): 669-680.
- [14] Malcolm G P A, Ferguson A I. Ti:sapphire laser pumped by a frequency doubled diode pumped Nd:YLF laser[J]. *Optics Communications*, 1991, 82(3/4): 299-304.
- [15] Imahoko T, Takasago K, Kamata M, *et al.* Development of a highly stable Yb:YAG thin disk pulsed green laser for high power Ti:sapphire based amplifier at 100 kHz repetition rate [J]. *Applied Physics B*, 2007, 89(2/3): 217-222.
- [16] Wagner G, Behrendt A, Wulfmeyer V, *et al.* High-power Ti:sapphire laser at 820 nm for scanning ground-based water-vapor differential absorption lidar [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(11): 2454-2469.
- [17] Zou L, Ding X, Wei Q F, *et al.* High power, high efficiency, all-solid-state quasi-continuous-wave Ti:sapphire laser system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(12): 1409-1412.
邹雷, 丁欣, 魏权夫, 等. 高功率、高效率、全固态准连续钛宝石激光器[J]. *中国激光*, 2004, 31(12): 1409-1412.
- [18] Ding X, Li X, Sheng Q, *et al.* High power widely tunable narrow linewidth all-solid-state pulsed titanium-doped sapphire laser [J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, 28(9): 094205.
- [19] Wang N, Wang R, Teng H, *et al.* Tunable deep UV narrow linewidth laser by frequency converted Ti:sapphire laser at 5 kHz repetition rate [C].

- Proceedings of Advanced Solid-State Photonics, 2012, AM4A: 27.
- [20] Zhang S K, Wang Q Y, Peng H S. Titanium-doped sapphire and ultrashort pulse laser[J]. High Power Laser & Particle Beams, 1997, 9(1): 149-156.
张树葵, 王清月, 彭翰生. 掺钛蓝宝石与超短脉冲激光[J]. 强激光与粒子束, 1997, 9(1): 149-156.
- [21] Xu R Q, Li J, Ni X W. A study on the dynamic characteristics of a quasi-continue wave Ti:sapphire [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 1999, 10(6): 512-515.
徐荣青, 李军, 倪晓武. 准连续钛蓝宝石激光器动力学特性的研究[J]. 光电子 • 激光, 1999, 10(6): 512-515.