

绿光半导体激光器直接抽运的钛宝石飞秒脉冲

王向林^{1,2}, 胡晓鸿^{1,2}, 徐 鹏¹, 张 伟¹, 杨 直¹, 王屹山¹

¹中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 对两个 1.45 W/520 nm 绿光半导体激光器的输出光束进行整形, 再将其聚焦到钛宝石激光晶体上进行抽运, 并结合 GTI(Gires-Tournois Interferometer)镜对腔内色散给予补偿, 实现了稳定的克尔透镜锁模运转, 输出脉冲激光的脉宽为 91 fs, 输出功率为 208 mW, 输出单脉冲能量为 1.59 nJ; 优化腔型参数后, 获得的最窄脉宽为 82 fs; 缩短腔长后, 获得的最高输出功率为 232 mW。

关键词 激光技术; 钛宝石激光器; 半导体激光器抽运源; 克尔透镜锁模; 飞秒脉冲

中图分类号 O434.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0701002

Ti:Sapphire Femtosecond Pulses Pumped Directly by Green Diode Lasers

Wang Xianglin^{1,2}, Hu Xiaohong^{1,2}, Xu Peng¹, Zhang Wei¹, Yang Zhi¹, Wang Yishan¹

¹State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision

Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shaanxi, Xi'an 710119, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The laser beams emitted from a pair of 520 nm/1.45 W green diode lasers are shaped and focused on a Ti:sapphire laser crystal to complete the pumping process. The intracavity dispersion is compensated by using the GTI (Gires-Tournois interferometer) mirrors. The stable Kerr-lens mode locking state is achieved with an output pulse width of 91 fs, an output power of 208 mW, and a single pulse energy of 1.59 nJ. The narrowest pulse width of 82 fs is further realized after the optimization of cavity-type parameters and the maximum output power reaches 232 mW when the cavity length is shortened.

Key words laser technique; Ti:sapphire laser; diode laser pumping source; Kerr-lens mode locking; femtosecond pulses

OCIS codes 320.7090; 320.5550; 230.4910

1 引 言

钛宝石激光器具有窄脉冲宽度、宽光谱带宽、良好稳定性等优点, 被广泛应用于阿秒产生、光学频率梳、激光微加工、强场物理、太赫兹波产生等^[1]方面。钛宝石激光器的诸多优点使它在生物医药领域^[2]也有着广泛应用, 包括双光子显微^[3]、光转染技术^[4]、细胞显微手术^[5]、光学相干断层扫描。在生物光子学的实际应用中, 通常需要脉宽为 100 fs 左右、平均功率约为 100 mW 的飞秒脉冲激光^[3-5]。现有的钛宝石激光器采用的抽运源, 通常是采用腔内倍频技术的 Nd:YVO₄ 激光器, 其结构复杂、能效低、价格昂贵。半导体激光器(LD)因为具有功率高、稳定性好、寿命长、能量转化效率高、体积小等优点, 已经在诸多固体

收稿日期: 2017-01-23; **收到修改稿日期:** 2017-02-24

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61308037)、国家自然科学基金重大项目(61690222, 61690220)、中国科学院国家外国专家“创新团队国际合作伙伴计划”

作者简介: 王向林(1979—), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事超短脉冲激光方面的研究。E-mail: wangxl@opt.ac.cn

导师简介: 王屹山(1970—), 男, 博士, 研究员, 主要从事超短脉冲激光方面的研究。

E-mail: yshwang@opt.ac.cn (通信联系人)

激光器和光纤激光器中作为抽运源使用。钛宝石激光器的吸收光谱处于蓝绿色光谱范围,随着 GaN 半导体激光器技术的迅速发展^[6],已有 445 nm 和 520 nm 的 LD 达到 1 W 以上输出功率^[7],能够满足钛宝石激光器抽运源的需要。采用 LD 直接抽运钛宝石激光器可提高能量转换效率,简化抽运源结构,降低成本。目前,主要应用的钛宝石激光振荡器(如光谱物理和相干公司产品)的脉宽为 6~100 fs,功率大于 300 mW。LD 直接抽运的钛宝石激光器的脉宽已小于 100 fs,能够符合大多数应用需求,但还需要提高其功率和输出单脉冲能量。

国际上已有关于 LD 直接抽运钛宝石激光器的研究。Roth 等^[8]利用 LD 直接抽运钛宝石激光晶体,实现了低阈值连续运转的钛宝石激光器;2011 年该研究组采用可饱和布拉格反射镜(SBR)实现了 114 fs、13 mW 的锁模脉冲运转^[9];2012 年他们采用 SBR 获得了更高功率的锁模脉冲输出^[10]。Durfee 等^[11]采用 445 nm 的 GaN 半导体激光器直接抽运钛宝石激光器,实现了克尔透镜锁模(KLM)运转,在中心波长 800 nm 处得到 15 fs、34 mW 的激光输出。Sawai 等^[12]实现了 520 nm 绿光 LD 直接抽运钛宝石的半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模,得到了 23.5 mW、62 fs 的飞秒脉冲激光输出;此后,他们又采用双端抽运将锁模功率提高到 44.8 mW^[13]。Gürel 等^[14]采用两个 520 nm 的 LD 双端抽运得到了 58 fs 脉冲输出,锁模功率为 450 mW。此外,另一种提高钛宝石激光器功率和输出单脉冲能量的有效途径是将 LD 激光倍频后作为抽运源,魏志义等^[15]报道了 488 nm 倍频光纤激光器抽运的亚 10 fs 钛宝石激光振荡器;Müller 等^[16]将 1 μm 附近波长的 LD 激光倍频后抽运钛宝石激光器,实现了锁模运转。

本文利用两个 520 nm 绿光 LD 双端抽运钛宝石激光器,获得了单脉冲能量为 1.59 nJ 的输出。

2 实验装置

LD 直接输出的激光光斑在其快轴上发散角大,而在慢轴上发散角小,因此绿光 LD 抽运源的激光空间模式分布会影响抽运效率,实际应用中要采用适当的准直和聚焦方案。选择两个 520 nm 绿光 LD 作为抽运源进行双端抽运,单个激光管输出功率标称值为 1 W,实验中工作电流为 2.5 A,输出功率为 1.45 W,使用水冷来保证 LD 在此功率下能够稳定运转。该 LD 快慢轴发散角的典型值分别为 46°和 11°,首先使用一个焦距为 4 mm 的非球面镜将快轴进行准直,再采用一对焦距分别为-25 mm 和 150 mm 的柱透镜对慢轴进行准直,LD 准直后光斑尺寸约为 3 mm×6 mm。准直光经过焦距为 60 mm 的透镜聚焦到钛宝石晶体上以实现抽运,聚焦后光斑尺寸约 2 μm×4 μm。快慢轴的发散角相差很大,要实现光束沿两轴方向聚焦到激光晶体上同一位置,就必须两轴焦距独立可调;且 LD 的发光区视为一个线光源,也要求快慢轴分别进行准直。

如图1所示,光路结构采用两个 LD 的双端抽运,是典型的 X 腔型。其中 M1 为激光耦合输出镜,M2 和 M3 构成一对 GTI 镜,用于腔内色散补偿,M4 为低色散宽带反射镜。M5 和 M6 为一对曲率半径为 50 mm 的凹面镜,对抽运光波长增透,同时在 700~900 nm 波长范围内高反射且具有低色散。激光增益介质选用长度为 4 mm 的钛宝石晶体,Ti 质量分数为 0.25%,吸收系数 α 为 $(5.5 \pm 0.35) \text{ cm}^{-1}$ (@532 nm),并且品质因数大于 150(@532 nm);为保证其稳定工作,需要进行循环水冷却。根据钛宝石晶体长度和腔长,确定腔内正色散量约为 520 fs²。实验中采用了两种 GTI 镜,第一种可提供总负色散量为 $-(600 \pm 80) \text{ fs}^2$;第二种可提供总负色散量为 $-(480 \pm 80) \text{ fs}^2$ 。仔细调节腔型参数、晶体位置、锁模区等,这两种 GTI 镜都能够实现

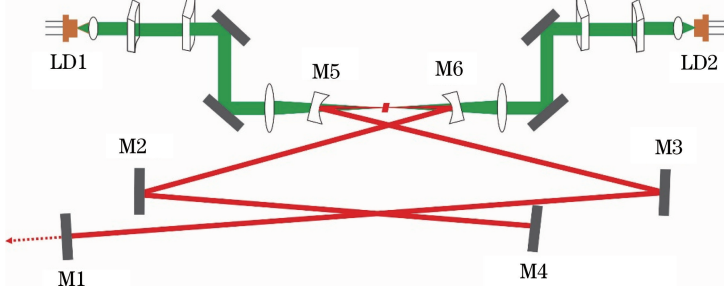


图 1 绿光 LD 直接抽运的钛宝石激光器结构

Fig. 1 Structural diagram of Ti:sapphire laser pumped directly by green diode laser

克尔透镜锁模。分别采用功率输出比为 2% 和 5% 的输出镜, 研究腔内功率对钛宝石激光振荡器工作状态的影响。

3 实验结果

光路搭建完成后, 调节腔内各器件位置及抽运光路, 得到连续激光输出, 在此基础上优化钛宝石晶体和凹面镜的位置, 获得最大激光输出功率。微调锁模区位置, 轻推固定在位移台上的 M3 实现克尔透镜锁模; 也可以轻推凹面镜来实现锁模。同时微调晶体位置来调节锁模光谱宽度, 最终实现容易启动且稳定的锁模运转。

如图 2(a) 所示, 实验中用二阶强度自相关仪测量了脉宽信息, 拟合得到的脉宽为 91 fs, 此时输出功率为 145 mW, 脉冲重复频率为 131 MHz, 激光光斑直径约为 1.5 mm。输出镜的功率耦合输出比为 5%, 腔内色散补偿由两个色散量为 -120 fs^2 的 GTI 镜提供。锁模光谱如图 2(b) 所示, 光谱半峰全宽 (FWHM) $\Delta\lambda = 7 \text{ nm}$, 腔内单脉冲能量为 22.1 nJ。在此情况下, 获得的最高功率为 208 mW, 输出单脉冲能量为 1.59 nJ。测得的抽运功率与输出功率之间的变化关系如图 2(c) 所示, 锁模运转 (红线) 的斜率效率为 10.8%, 锁模前 (黑线) 的连续运转斜率效率为 10.2%, 锁模后功率略高于锁模前连续功率。

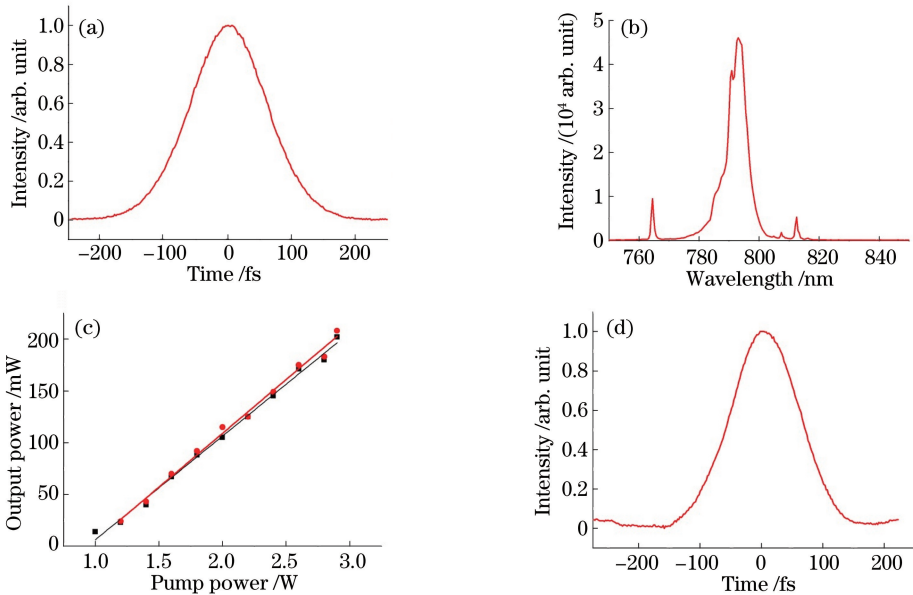


图 2 实验结果。(a) 锁模脉宽自相关曲线; (b) 锁模脉冲光谱; (c) 抽运功率与输出功率之间的关系; (d) 优化脉宽的自相关曲线

Fig. 2 Experimental results. (a) Autocorrelation curve of mode-locked pulse width; (b) spectrum of mode-locked pulse; (c) relationship between pump power and output power; (d) autocorrelation curve of optimal pulse width

为了获得更窄的脉宽, 更换了部分器件, 优化了晶体位置, 得到图 2(d) 所示的自相关曲线, 此时脉宽为 82 fs, 输出功率为 104 mW, 重复频率为 134 MHz。所采用的输出镜的功率输出比为 2%, 并由两个 -150 fs^2 色散量的 GTI 镜补偿腔内色散。输出单脉冲能量为 0.78 nJ, 腔内单脉冲能量为 38.8 nJ。

此外, 还进行了优化功率实验, 腔型结构如图 3(a) 所示。缩短腔长后获得 232 mW 的 KLM 飞秒激光输出, 脉冲宽度为 210 fs, 重复频率为 338 MHz, 如图 3(b) 所示。此时采用的是功率输出比为 5% 耦合输出镜。在同样参数条件下, 5% 输出镜比 2% 的可获得更高的输出功率。色散补偿仍然使用一对色散量为 -120 fs^2 的 GTI 镜。输出单脉冲能量为 0.69 nJ, 腔内单脉冲能量为 13.7 nJ。

比较图 2(a)、2(d)、3(b) 可知, 图 2(d) 情况下的腔内单脉冲能量最高, 脉宽最窄; 而图 3(b) 情况下腔内单脉冲能量最低, 脉宽最宽。因此, 腔内单脉冲能量影响了自相位调制效应的强弱, 是决定脉宽的主要因素。虽然实验中采用了不同 GTI 镜对色散量进行调节, 但由于光谱较窄, 两种色散量不同的 GTI 镜对脉宽、输出功率和光谱的影响效果不显著, 且均能够实现稳定且容易启动的克尔透镜被动锁模。

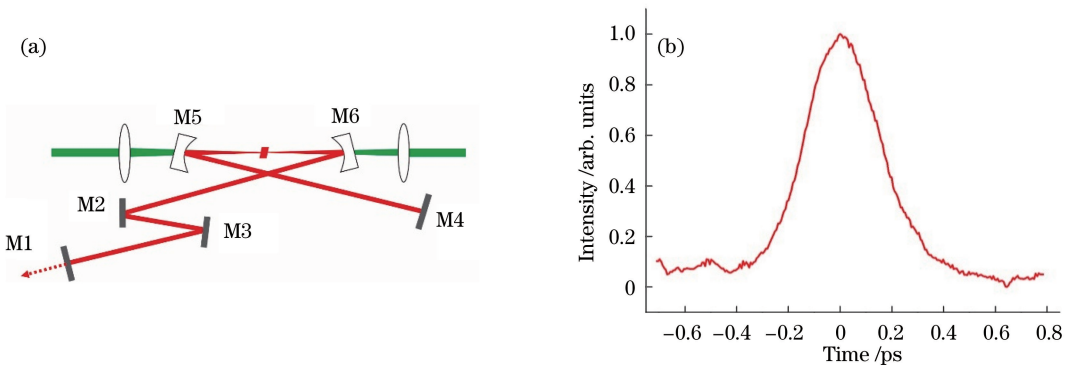


图 3 输出功率优化。(a)缩短腔长的腔型;(b)优化功率后脉宽的自相关曲线

Fig. 3 Optimization of output power. (a) Cavity-type after cavity shortening; (b) autocorrelation curve of pulse width after output power optimization

4 结 论

对两个 1.45 W 的 520 nm 绿光 LD 的光束进行光束整形,然后将其聚焦到钛宝石激光晶体上进行抽运,结合 GTI 镜对腔内色散进行补偿,实现了稳定的 KLM 运转,输出脉宽为 91 fs,输出功率为 208 mW。通过优化腔型参数,获得的最窄脉宽为 82 fs,此时输出功率为 104 mW。缩短腔长后,输出脉冲激光功率达到 232 mW,脉宽为 210 fs。经分析,腔内单脉冲能量对最终的输出脉宽有重要影响。LD 直接抽运的钛宝石锁模激光器易于小型化,可大幅度降低成本。由于单个 520 nm LD 输出功率较低,因此有望通过多束抽运的方式提高锁模功率,并采用啁啾镜补偿腔内色散实现更宽光谱的锁模脉冲,从而获得更窄的脉宽,拓展该类激光器的应用。

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): 6989-7001.
- [3] Girkin J M, McConnell G. Advances in laser sources for confocal and multiphoton microscopy[J]. *Microscopy Research and Technique*, 2005, 67(1): 8-14.
- [4] Stevenson D, Agate B, Tsampoula X, *et al.* Femtosecond optical transfection of cells: Viability and efficiency[J]. *Optics Express*, 2006, 14(16): 7125-7133.
- [5] Ando J, Bautista G, Smith N, *et al.* Optical trapping and surgery of living yeast cells using a single laser[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79(10): 103705.
- [6] Nakamura S, Senoh M, Nagahama S I, *et al.* InGaN-based multi-quantum-well-structure laser diodes[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1996, 35(1B): L74-L76.
- [7] Masui S, Miyoshi T, Yanamoto T, *et al.* 1 W AllInGaN based green laser diodes[C]. *Proceedings of the IEEE Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim*, 2013: 1-2.
- [8] Roth P W, Maclean A J, Burns D, *et al.* Directly diode-laser-pumped Ti:sapphire laser[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(21): 3334-3336.
- [9] Roth P W, Maclean A J, Burns D, *et al.* Direct diode-laser pumping of a mode-locked Ti:sapphire laser[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(2): 204-206.
- [10] Roth P W, Burns D, Kemp A J. Power scaling of a directly diode-laser-pumped Ti:sapphire laser[J]. *Optics Express*, 2012, 20(18): 20629-20634.
- [11] 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.
- [12] Sawai S, Hosaka A, Kawauchi H, *et al.* Demonstration of a Ti:sapphire mode-locked laser pumped directly with a green diode laser[J]. *Applied Physics Express*, 2014, 7(2): 022702.

-
- [13] Tanaka H, Sawada R, Kariyama R, *et al.* Power scaling of modelocked Ti:sapphire laser pumped by high power InGaN green laser diode[C]. The European Conference on Lasers and Electro-Optics, 2015: CA62.
- [14] Gürel K, Wittwer V J, Hoffmann M, *et al.* Green-diode-pumped femtosecond Ti:Sapphire laser with up to 450 mW average power[J]. Optics Express, 2015, 23(23): 30043-30048.
- [15] Yu Z J, Han H N, 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.
- [16] Müller A, Jensen O B, Unterhuber A, *et al.* Frequency-doubled DBR-tapered diode laser for direct pumping of Ti:sapphire lasers generating sub-20 fs pulses[J]. Optics Express, 2011, 19(13): 12156-12163.