·激光技术·

蓝光激光二极管直接泵浦的自启动皮秒钛宝石激光器(特邀)

刘 寒[1],王红英[1],赵小侠[1],卢一鑫[1],王 迪[1],张运良[1],等[2*,3]

(1.西安文理学院 机械与材料工程学院,西安;2.西安电子科技大学 光电工程学院,西安;
3.中国科学院物理研究所北京凝聚态物理国家实验室,北京)

摘 要:介绍了一款465 nm蓝光激光二极管泵浦的自启动皮秒钛宝石激光器。该激光器采用双侧泵浦结构,弥补了模式匹配的不足,充分利用了低掺杂浓度、长通光长度的钛宝石晶体,当泵浦功率为7 W时,获得了718 mW的连续光输出,且未观测到明显的泵浦诱导损耗现象。在SESAM的辅助下,获得371 mW、6 ps的可自启动的被动锁模输出,而且10 h内输出功率的RMS值小于0.5%。

关键词:激光二极管;钛宝石;自启动;皮秒;被动锁模

中图分类号:TN248 **文献标识码**:A **文章编号**:1673-1255(2022)-04-0070-05

Self-starting Mode-locked Picosecond Ti:sapphire Laser Directly Pumped by Blue Laser Diodes *(Invited)*

LIU Han[1], WANG Hongying[1], ZHAO Xiaoxia[1], LU Yixin[1], WANG Di[1], ZHANG Yunliang[1], et al[2*,3]

(1. School of Mechanical and Material Engineering, Xi'an University, Xi'an, China;
2. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, China;
3. Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China)

Abstract: A self-starting picosecond Ti:sapphire laser pumped by 465 nm blue laser diodes is introduced. A double-side pumping structure is adopted in the laser, which makes up for the lack of mode matching and makes full use of the Ti:sapphire crystal with low doping concentration and long optical length. When the pump power is 7 W, a continuous wave output power of 718 mW is achieved and no obvious pump-induced loss phenomenon is observed. With the assistance of semiconductor saturable absorber mirror (SESAM), the self-starting passive mode-locking output of 371 mW and 6 ps is obtained, and the RMS value of the output power is less than 0.5% within 10 hours.

Key words: laser diode; Ti:sapphire; self-starting; picosecond; passive mode-locking

随着激光技术的发展,钛宝石激光器的泵浦技术也经历了多次更新,其中包括:闪光灯、氩离子激光器、光学泵浦的半导体激光器(OPSL, optical pump semiconductor laser)和532 nm全固态激光器(DPSSL, direct pumped solid state laser)等。目前钛宝石激光器主流采用DPSSL进行泵浦,其不仅可提供几瓦至数十瓦的功率输出,而且具有非常出色的功率稳定性和光束质量。然而,价格昂贵的DPSSL在一定程度上限制了钛宝石激光器的应用与推广。

2008年,第一支输出功率为瓦级的蓝光激光二极管(LD)问世,英国ROTH等人率先验证了LD直接泵浦钛宝石的可行性,获得了19 mW的连续光输出,从此LD直接泵浦钛宝石研究正式拉开了序幕[1-3]。LD具有性能稳定、价格低廉、体积小等显著优势。采用高功率LD代替DPSSL泵浦钛宝石激光器,可以有效地降低钛宝石激光器成本和系统噪声,还有利于激光系统的集成化。

经过数十年发展,LD直接泵浦钛宝石激光器已

收稿日期:2022-07-25
基金项目:国家自然科学基金(62105253);科技部国家重点研发计划(2016YFB0402105)

经拥有不俗的输出表现,在某一些参数上可与传统钛宝石激光器相媲美[4-8]。2021年,课题组从LD泵浦的钛宝石激光器中获得短至8.1 fs的超短脉冲,是同类型激光器中的输出纪录,但是输出功率仅为27 mW[9]。2022年,韩国研究团队通过复杂的空间合束,在10 W的泵浦功率下获得了1 W、55 fs的被动锁模输出[10]。目前所采用的锁模方式主要为:克尔透镜锁模(KLM,Kerr-lens mode-locking)和可饱和吸收镜(SESAM,semiconductor saturable absorber mirror)被动锁模。KLM锁模不受自身带宽的限制,可获得较窄的脉冲宽度,但其对光源的亮度和模式匹配要求较为苛刻,而且对环境扰动敏感,不能自启动;SESAM锁模对泵浦源要求较为松泛,抗干扰能力强,且可自启动,实验方便快捷。目前,蓝光LD泵浦钛宝石过程中还存在着一个悬而未决的问题,即泵浦诱导损耗(PIL,pump-induced loss)现象,虽然不会直接影响激光器的稳定性,但是会限制整个激光系统的转换效率[11]。钛宝石的发明者PETER F M、国内的上海剑桥大学、上海光机所、复旦大学、中国科学技术大学均对该现象进行了细致的研究与分析,仍然没有给出一个明确的定论[12-16]。猜测低掺杂的钛宝石晶体可减弱该诱导损耗现象,设计了相关实验。

采用465 nm蓝光LD对低掺杂浓度的钛宝石晶体进行了双端泵浦,当泵浦功率为7 W时,实现了711 mW的连续光运转,在SESAM的辅助下,获得了371 mW、6 ps的可自启动的被动锁模输出,整个过程中未观测到明显的PIL现象。

1　实验装置与结果

实验装置如图1所示。

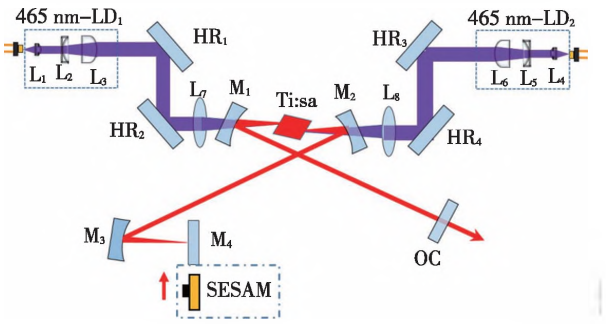


图1　钛宝石激光器实验装置示意图

激光谐振腔采用经典的X腔型,两个发射波长为465 nm、输出功率为3.5 W的蓝光LD作为泵浦源,其运行寿命可超过10 000 h,该LD的快轴和慢轴的M^2因子分别为1.5和12。为了实现较好的模式匹配,采用非球面透镜和柱透镜组成的整形系统对泵浦光束进行光束整形。整形后的泵浦光通过焦距为75 mm的平凸聚焦镜耦合进以布儒斯特角切割的钛宝石晶体(掺杂浓度为0.15 wt.%,4.8 mm的通光长度,吸收系数为3 cm^{-1}@532 nm)之中。钛宝石晶体对465 nm泵浦光的单程吸收为76%,吸收系数约为2.5 cm^{-1}@465 nm。钛宝石晶体采用水循环冷制,温度保持在15 ℃。激光腔由M_1、M_2、SESAM/M_4、OC构成:M_1和M_2是曲率半径为100 mm的双色凹面镜用于约束腔内激光模式,晶体中心处激光的束腰半径约为25 μm;M_4为宽度介质膜激光高反镜,用于实现连续激光运转;OC是一个传输率为3%和5%的平面输出耦合镜;整个激光器腔长为0.808 m,对应的重复频率为185 MHz。在实验中,为了最大程度的简化被动锁模实验,采用SESAM作为锁模元件,且腔内未使用任何色散补偿元件。为了达到SESAM的饱和能流,采用曲率半径为100 mm的凹面镜M_3将腔内激光聚焦于SESAM(非饱和吸收损耗:1%,恢复时间:3 ps)之上。

采用3%和5% OC对激光器的连续激光输出特性进行了观测,其所对应的泵浦阈值分别为1.2 W和1.8 W,如图2所示。

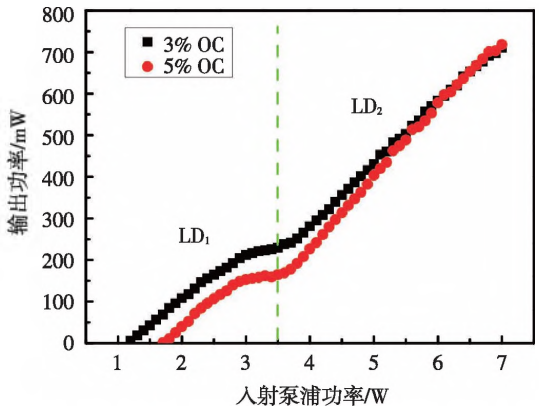


图2　LD双侧泵浦钛宝石激光器分别在3%和5% OC下连续光功率输出表现

当泵浦功率为0~3.5 W时,两种OC的输出差异较为明显,3% OC可输出较高的功率,意味着使用3% OC比5% OC具有更大的增益。随着泵浦功率的逐渐增大,两种OC下的激光输出表现差异逐渐

缩小。在最大入射泵浦功率下，3%和5% OC分别获得711 mW和718 mW的连续光输出，光-光转化效率约为10%。当入射泵浦功率为3~3.5 W时，连续光输出略微出现饱和迹象。由于LD光束质量较差，单个LD光束与腔内激光在晶体内部有效重叠的空间长度较短，容易造成低掺杂的钛宝石晶体出现饱和现象。图3为双侧泵浦结构下，实测泵浦光与激光模式的分布情况。

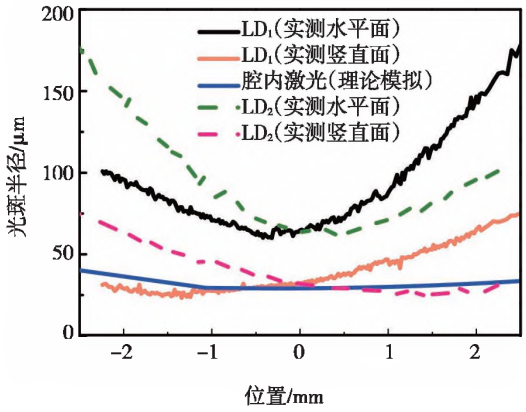
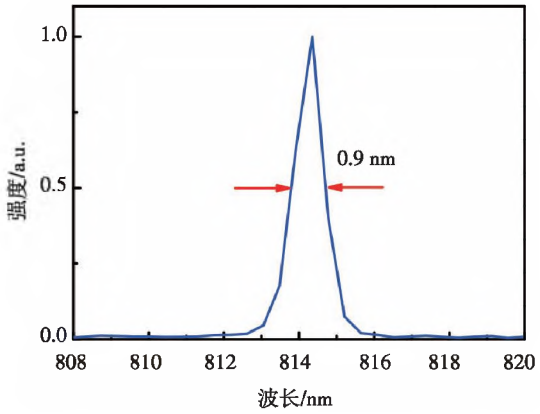


图3 双侧泵浦结构下，实测泵浦光与激光模式的分布情况

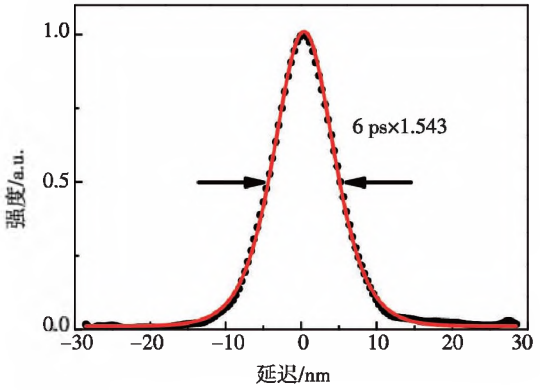
根据图3中的泵浦光、激光模式分布来看，采用双侧泵浦可以充分利用较长的晶体，在一定程度上弥补了较差的模式匹配，实现输出功率的有效提升。说明了在高功率LD泵浦钛宝石过程中，相比对单侧泵浦结构，双侧泵浦结构具有显著的优势。最重要的是在整个过程中未观测到显著的PIL现象，低掺杂的钛宝石晶体有利于减弱和消除PIL现象。

进一步观测LD直接泵浦低掺杂钛宝石的输出表现，将锁模元件SESAM插入腔内，仅仅需要调节SESAM上的聚焦光斑尺寸即可实现被动锁模运转。当泵浦功率小于3.1 W时，锁模出现不稳定的调Q锁模状态，这是由于低增益饱和通量导致的。随着泵浦功率的增加和细微地调节，激光开始工作在连续光锁模状态。在7 W的泵浦功率下，最大的锁模输出为371 mW，对应的锁模光-光转换效率为5.3%，SESAM自身的非饱和吸收损耗特性导致出现了较强的功率损耗。

随后对锁模激光的光谱和脉冲宽度的自相关曲线进行测量，如图4所示。锁模光谱的半高全宽为0.9 nm，中心波长处于814.4 nm(图4a)，该光谱对应的傅里叶变换极限脉冲为773 fs；假设脉冲为双曲正割型，对强度自相关信号进行拟合，脉冲宽度为6 ps(图4b)，其远大于变换极限脉冲宽度，由于激光腔内没有采用任何色散补偿元件对自相位调制、材料色散进行补偿。如果在腔内插入三棱镜对或啁啾镜等进行色散补偿，就可获得飞秒量级的脉冲输出。



(a)锁模光谱

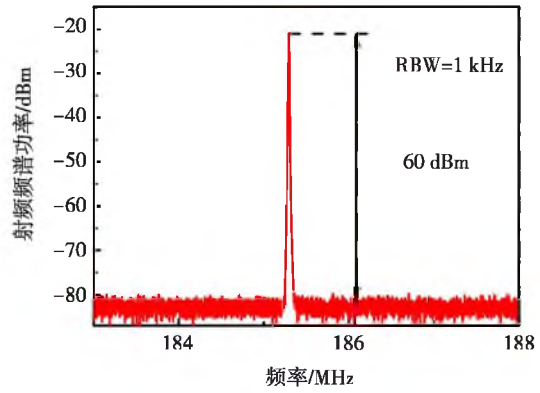


(b)脉冲的强度自相关曲线

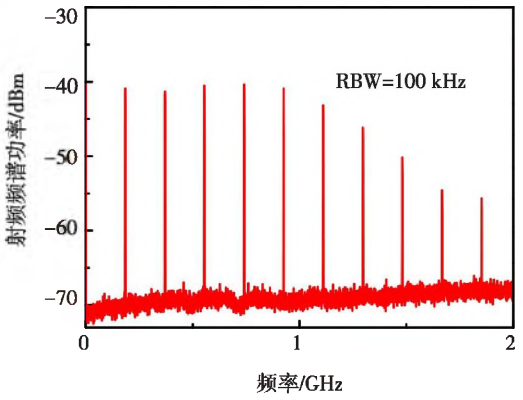
图4 LD泵浦钛宝石激光器的被动锁模运转

为了检测SESAM被动锁模的运转状态，对LD直接泵浦钛宝石锁模激光器的射频频谱进行了测量。如图5a所示，在1 kHz分辨率下，在185.4 MHz处测得信噪比为60 dBm的基频信号，射频频谱干净且基频两侧无明显的谐波旁瓣。在2 GHz频率范围内(分辨率为100 kHz)，也没有观测到任何谐波调制图5b。说明该锁模激光器稳定的运行在基频状态。

LD泵浦的钛宝石自启动锁模激光器连续工作10 h，其表现出了非常出色的功率稳定性，功率不稳定性小于0.5% RMS(图6)，而且输出光斑近似圆形。由于该激光器裸露于空气之中，仍然会受到实验室空气的扰动、温度变化等因素的影响，若将其置于保护罩之内会进一步提升其功率稳定性。



(a)1 kHz分辨率下基频射频频谱



(b)100 kHz分辨率下2 GHz频率范围的射频频谱

图5　LD泵浦的钛宝石锁模激光器射频频谱图

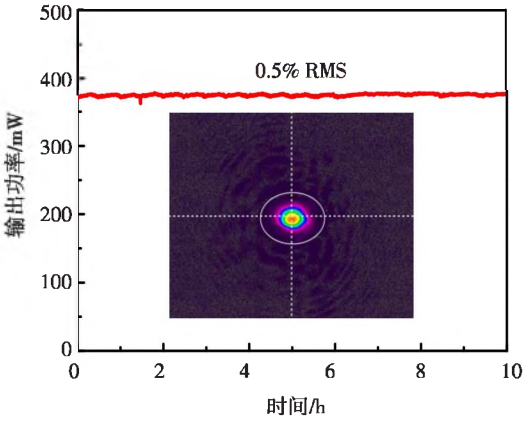


图6　LD泵浦的钛宝石锁模激光器10 h内的功率稳定性,内插图为锁模激光光斑

2　结　论

采用蓝光LD对0.15 wt.%、4.8 mm的钛宝石晶体进行双端泵浦,不仅未观测到泵浦诱导损耗现象,SESAM的辅助下,在中心波长814.4 nm处,实现了371 mW、6 ps可自启动的被动锁模输出。从实验中初步验证了:低掺杂浓度钛宝石晶体有助于减弱或消除PIL现象;通过优化的双侧泵浦结构设计可充分利用较长、低掺杂钛宝石晶体,在一定程度上弥补了模式匹配差的不足,解决了功率饱和现象,并实现了输出功率的有效提升。将在后续实验中着重分析晶体掺杂、吸收与PIL现象之间的相关性。在此实验基础之上可增加相应的色散补偿元件,即可实现数百毫瓦的飞秒激光输出。这种可自启动、低成本、高稳定性的钛宝石激光振荡器将在光学频率梳[17-18],多光子成像[19]等应用领域得到更广泛的关注。

参考文献

[1] 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.

[2] 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): 304-306.

[3] ROTH P W, BURNS D, KEMP A J. Direct diode-laser pumping of a mode-locked Ti:sapphire laser[J]. Optics Express, 2012, 20(18): 20629-20634.

[4] 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): 13676-13683.

[5] 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.

[6] BACKUS S, KIRCHNER M, LEMONS R, et al. Direct diode pumped Ti:sapphire ultrafast regenerative amplifier system[J]. Optics Express, 2017, 25(4): 3666-3674.

[7] BACKUS S, KIRCHNER M, DURFEE C, et al. Direct diode-pumped Kerr lens 13 fs Ti:sapphire ultrafast oscillator using a single blue laser diode[J]. Optics Express, 2017, 25(11): 12469-12477.

[8] COYLE J C E, KEMP A J, HOPKINS J M, et al. Ultrafast diode-pumped Ti:sapphire laser with broad tunability[J]. Optics Express, 2018, 26(6): 6826-6832.

[9] LIU H, WANG G Y, JIANG J W, et al. Sub 10 fs pulse generation from a blue laser-diode-pumped Ti:sapphire oscillator[J]. Chinese Optics Letter, 2020, 18(7): 071402.

[10] SONG D H, SEO H S. Spectrally combined three-diode-pumped compact femtosecond Ti:sapphire laser exceeding 1 W mode-locked power[J]. Optics Express,

2021, 29(20/27): 32649-32657.

[11] SAWADA R, TANAKA H, SUGIYAMA N, et al. Wavelength-multiplexed pumping with 478 and 520 nm indium gallium nitride laser diodes for Ti:sapphire laser[J]. Applied Optics, 2017, 56(6): 1654-1661.

[12] MOULTON P F, CEDERBERG J G, STEVENS K T, et al. Optimized InGaN-diode pumping of Ti:sapphire crystals [J]. Optical Materials Express, 2019, 9(5/1): 2131-2146.

[13] HAN X, FENG X, LI W, et al. One kind of new Ti^{3+} luminous center in Ti:Al_2O_3 crystals[J]. Optical Materials, 2020 (105): 109881.

[14] GONG Q, ZHAO C, LI S, et al. Theoretical study on near UV and visible optical absorption characteristics of Ti-doped α-Al2O3 single crystals[J]. Materials Today Communications, 2021(28): 102506.

[15] JING W, LIU M, WEN J, et al. First-principles study of Ti-doped sapphire formation and optical transition properties of titanium pairs[J]. Physical Review B, 2021, 104 (16): 165103.

[16] JING W, LIU M, WEN J, et al. First-principles study of Ti-doped sapphire formation and reduction of complex defects[J]. Physical Review B, 2021, 104(16): 165104.

[17] Gürel K, WITTWER V J, HAKOBYAN S, et al. Carrier envelope offset frequency detection and stabilization of a diode-pumped mode-locked Ti:sapphire laser[J]. Optics Letters, 2017, 42(6): 1035-1038.

[18] MARIN P C, MITCHELL T, SUN J H, et al. Characterization of a carrier-envelope-offset-stabilized blue-and green-diode-pumped Ti:sapphire frequency comb[J]. Optics Letters, 2019, 44(21): 5270-5273.

[19] ROHRBACHER A, OLARTE O E, VILLAMAINA V, et al. Multiphoton imaging with blue-diode-pumped SESAM-mode locked Ti:sapphire oscillator generating 5 nJ 82 fs pulses [J]. Optics Express, 2017, 25(9): 10677-10684.

文中作者还有田文龙,朱江峰,魏志义

《光电技术应用》编辑部征稿通知

《光电技术应用》期刊是中国电子科技集团公司主管,中国电子科技集团公司光电研究院主办,公开发行的学术性中文科技期刊。以光电技术为主要专业特色,传播光电技术、光电系统应用技术专业领域的先进科技信息,报道新型科技成果,推动工程技术交流,促进行业科技进步与发展。

期刊已成为《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊、《中文科技期刊数据库》收录期刊、《中国期刊全文数据库》全文收录期刊、《中国学术期刊综合评价数据库》统计源期刊、美国《乌利希期刊指南》收录期刊。期刊的影响因子连续几年上升,2015~2022年连续入选《中国学术期刊影响因子年报》统计源期刊。

本刊征集具有创新性的未曾公开发表过的最新研究成果。

期刊所设栏目主要有:综述,光电系统,光学设计,红外技术,激光技术,光电探测,光电器件与材料,信号与信息处理,电路与控制,测试、试验与仿真等。

来稿应内容新颖,论点明确,论据充分,数据可靠,文字精炼,用词规范。论文应含中文与英文的文章题目(20字以内)、作者姓名、作者所在单位的对外名称、单位所在省、市、邮政编码、摘要、关键词(3~8个)。

期刊拥有优秀的编委会成员,审稿专家涉及光电技术的各个领域,审稿速度快、质量高;编辑人员具有较高的职业素质、反馈速度快;期刊版面设计合理、美观大方;印刷质量好,出刊及时。对于优秀论文可以减收或不收版面费。

编辑部通信地址:天津市空港经济区纬五道9号 300308

联系电话:022-59067938

投稿邮箱:aoe-cetc@cetc.con.cn

联系人:朱编辑 牛编辑 杨编辑

《光电技术应用》编辑部