

激光与光电子学进展

915 nm 激光二极管端面泵浦的高稳定性全固态 355 nm 紫外激光器

侯杰, 贾海旭*, 白雅苏拉

北京华岸科技有限公司, 北京 100176

摘要 报道了一种利用中心波长为 915 nm 的激光二极管(LD)泵浦的中心波长为 355 nm 的高稳定性全固态紫外激光器。在该激光器中,将中心波长为 915 nm,线宽为 5.3 nm 的 LD 作为泵浦源,端面泵浦 Nd:YVO₄ 晶体,并将两块 LBO 晶体分别作为二倍频和三倍频晶体。采用 V 型平凸非稳腔结构和声光调 Q 方式,获得了稳定运行的中心波长为 355 nm 的全固态紫外激光器。当重复频率为 30 kHz,泵浦功率为 45 W 时,紫外激光器的输出功率为 3.7 W,脉冲宽度约为 13 ns,光光转换效率约为 8.2%,光束质量因子 M^2 小于 1.2 且在 6 h 运行时间内,输出功率稳定性(峰峰值)小于 4.5%。

关键词 激光器; 紫外激光器; 915 nm; 三倍频; 355 nm; LBO 晶体

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1914003

355 nm all-solid state ultraviolet laser with high stability end-pumped by 915 nm laser diode

Hou jie, Jia Haixu*, Baiya Sula

Beijing Huaan Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China

Abstract A highly stable all-solid state ultraviolet laser with a center wavelength of 355 nm pumped by a laser diode (LD) with a center wavelength of 915 nm is demonstrated. LD with a central wavelength of 915 nm and linewidth of 5.3 nm is used as a pump source to end-pump Nd:YVO₄ crystal, and two LBO crystals are used as frequency doubling crystal and frequency tripling crystal in the laser. A stable all-solid state ultraviolet laser with a center wavelength of 355 nm is obtained by using V-shaped plane-convex unstable resonator structure and acousto-optic Q-switching mode. When the repetition rate is 30 kHz and the pump power is 45 W, the output power of the ultraviolet laser is 3.7 W, the pulse width is about 13 ns, optical-to-optical efficiency is 8.2%, the beam quality factor M^2 is less than 1.2, and the output power stability (peak-to-peak value) is less than 4.5% in 6 hours of running time.

Key words lasers; ultraviolet laser; 915 nm; frequency tripling; 355 nm; LBO crystal

OCIS codes 140.3480; 140.3540; 140.3610; 190.2620

1 引言

由于紫外激光的波长较短,因此具有单光子能

量高、聚焦性能好的优点。在加工过程中,高能量的紫外激光光子可以直接破坏材料的化学键,属于“冷加工范畴”。此外,紫外激光可以聚焦为极小光

收稿日期: 2021-01-09; 修回日期: 2021-01-11; 录用日期: 2021-02-04

通信作者: *jiahaixu@163.com

斑,故紫外激光在微加工和精细加工领域有着广泛的应用^[1-7]。激光二极管(LD)泵浦的中心波长为 355 nm 的全固态紫外激光器具有体积小、效率高、寿命长等优点,近年来发展迅速,成为激光技术领域研究热点之一。利用中心波长为 808 nm 的 LD 端面泵浦 Nd:YVO₄ 晶体输出波长为 1064 nm 的激光,并将该输出激光作为基频光,在进行腔外或腔内三倍频(THG)操作后可获得波长为 355 nm 的紫外激光^[8-9]。但是,利用中心波长为 808 nm 的 LD 端面泵浦 Nd:YVO₄ 晶体产生波长为 1064 nm 的激光时,会有较高的量子亏损,产生的废热较多。而且,在 α 轴切割的 Nd:YVO₄ 晶体中,相互正交的晶体轴对波长为 808 nm 泵浦光的吸收系数有较大差别。当泵浦光偏振方向在 Nd:YVO₄ 晶体的两个轴向上的分布改变时,会造成晶体温度分布的变化,热透镜焦距也会有明显改变^[10],这增加了 Nd:YVO₄ 晶体对热透镜的管理难度。针对此问题,研究人员通过改进工艺、改进晶体散热方式,以及精密设计晶体热沉夹具以减小晶体热应力的方式来提升激光晶体对热透镜的管理能力。但是这样做需要较高的成本,且此类技术较难操作。因此,通过减少量子亏损来减少废热产生的方法受到了研究人员的广泛关注。

2006 年,McDonagh 等^[11]使用中心波长为 888 nm 的 LD 泵浦 Nd:YVO₄ 晶体,实现了基模功率为 60 W、波长为 1064 nm 激光的连续输出。对应的光光转换效率为 55%,光束质量 M^2 为 1.05。2007 年,McDonagh 等^[12]又提出了一种利用中心波长为 888 nm 的 LD 泵浦 Nd:YVO₄ 晶体的非线性变频激光器。利用内腔倍频技术,获得了功率为 62 W 的绿光,此时的泵浦功率为 211 W,光光转换效率为 29%,光束质量 M^2 为 1.05,均方根噪声值为 0.05%。2013 年,翟霁^[13]研究了利用中心波长为 914 nm 的 LD 直接泵浦 Nd:YVO₄ 晶体的激光器。通过数值模拟,对比了中心波长为 914、808、880 nm 的 LD 分别作为泵浦源时,激光器在热效应、激光阈值等方面的区别,认为将波长为 914 nm 的 LD 作为

泵浦源时,温度分布更均匀,热应力更小,更有利于获得高质量的激光输出。2016 年,Liu 等^[14]提出了将中心波长为 878.6 nm 的锁波长 LD 作为泵浦源,Nd:YVO₄ 晶体作为激光晶体的横电磁(TEM₀₀)模主振荡功率放大器(MOPA)激光器,采用声光调 Q 方式,在重复频率为 100 kHz 时,得到的最大输出功率为 120.8 W,光光转换效率为 47%。在重复频率为 20 kHz 时,得到的最大单脉冲能量为 4.85 mJ,脉冲宽度为 15 ns,光光转换效率为 37.7%。2017 年,Li 等^[15]利用中心波长为 913.9 nm 的锁波长 LD 泵浦 Nd:YVO₄ 晶体,当输入功率为 40 W 时,获得了输出功率为 23 W 且波长为 1064 nm 的激光输出,相应的光光转换效率为 58.5%。

由以上分析可知,利用中心波长为 880 nm 和 915 nm 的 LD 均可有效提升激光器的稳定性,降低对热透镜和热应力的管理难度。但是与中心波长为 880 nm 的 LD 相比,中心波长为 915 nm 的 LD 不论是制造成本还是工艺技术均具有一定的优势,故其在光纤激光器市场中得到了广泛的应用^[16]。本文将中心波长为 915 nm 的 LD 作为泵浦源,实现了中心波长为 355 nm 的紫外激光器的高效、稳定运转。另外,值得一提的是,实验中采用的元件均为国产器件。

2 实验设计

2.1 基频光的实验设计

因为稳定运行的高质量波长为 1064 nm 的基频光是生成波长为 355 nm 紫外激光的基础,所以进行了利用中心波长为 915 nm 的 LD 端面泵浦 Nd:YVO₄ 晶体生成波长为 1064 nm 基频光的实验。在紫外激光实验中,采用的是基于 V 型折叠腔的腔内倍频方案,而基频光在激光腔内运行,不能直接测量,故采用直腔测量实验方案。在直腔测量实验方案中输出的激光功率值可与较为成熟的利用中心波长为 808 nm LD 直接泵浦 Nd:YVO₄ 晶体实验的测量结果进行对比,进而可以研究直腔测量实验方案的可行性。红外激光实验示意图如图 1 所示,其中 1 为

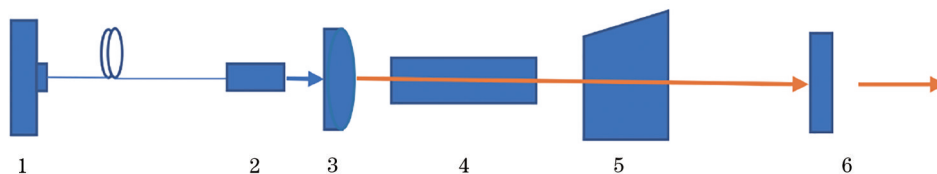


图 1 红外激光实验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of infrared laser experiment

中心波长为 915 nm/808 nm 的 LD, 2 为光纤耦合扩束镜, 3 为平凸透镜, 4 为 Nd:YVO₄ 晶体, 5 为声光调 Q 晶体, 6 为输出镜。

实验中分别选用了两种 LD 进行红外实验, 一种 LD 为北京大族天成半导体技术有限公司生产的光纤输出 LD 模块, 中心波长在 915 nm 左右, 线宽为 5.3 nm, 该模块的最大输出功率为 65 W, 输出光纤纤芯直径为 105 μm, 数值孔径为 0.22。LD 通过自制的光斑尺寸放大比例为 1:10 的耦合透镜端面泵浦 Nd:YVO₄ 晶体, 晶体尺寸为 1.8 mm×1.8 mm×20 mm, 掺杂浓度(原子数分数, 下同)为 1%, 晶体两端镀有对波长 915 nm 的光高透和对波长 1064 nm 的光高透的膜层, 并使用导热胶将晶体粘接在铜热沉之中。利用半导体制冷器(TEC)精确控温, 将温度控制在 25 °C, 控温精度为 0.01 °C。另一种 LD 为山东浪潮华光光电子股份有限公司生产的光纤输出 LD 模块, 中心波长在 808 nm 左右, 线宽为 2.2 nm, 该模块的最大输出功率为 40 W, 输出光纤纤芯直径为 400 μm, 数值孔径为 0.22。LD 通过自制的光斑尺寸放大比例为 1:3 的耦合透镜端面泵浦 Nd:YVO₄ 晶体, 晶体尺寸为 2 mm×2 mm×20 mm, 掺杂浓度为 0.3%, 晶体两端镀有对波长为 808 nm 的光高透和对 1064 nm 的光高透的膜层, 并使用导热胶将晶体粘接在铜热沉之中。利用 TEC 精确控温, 温度控制在 25 °C, 控温精度为 0.01 °C。

实验中均采用平凸直行腔, 谐振腔长约为 180 mm。在 LD 中心波长为 915 nm 的实验中, 前腔镜为曲率半径为 500 mm 的平凸透镜, 平面镀有对波长为 915 nm 的光高透的膜层, 凸面镀有对波长为 915 nm 的光高透且对波长为 1064 nm 的光高反的膜层。后腔镜为平镜, 镀有对波长为 915 nm 的光高透且对波长为 1064 nm 的光的透过率为 30% 的膜层。在 LD 中心波长为 808 nm 的实验中, 前腔镜为曲率半径为 500 mm 的平凸透镜, 平面镀有对波长为 808 nm 的光高透的膜层, 凸面镀有对波长为 808 nm 的光高透且对波长为 1064 nm 的光高反的膜层。后腔镜为平镜, 镀有对波长为 808 nm 的光高透且对波长为 1064 nm 的光的透过率为 30% 的膜层。

2.2 紫外激光的实验设计

设计了利用中心波长为 915 nm 的 LD 端面泵浦 Nd:YVO₄ 晶体的中心波长为 355 nm 的全固态紫外激光实验, 实验示意图如图 2 所示。其中, 1 为中心

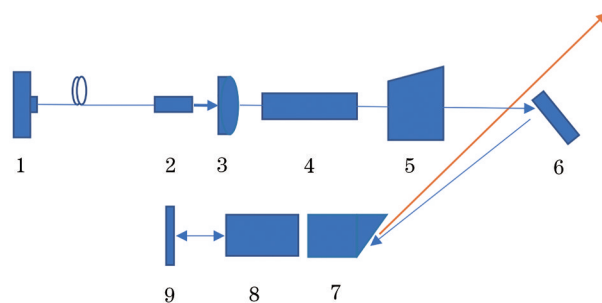


图 2 紫外激光实验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of ultraviolet laser experiment

波长为 915 nm 的 LD, 2 为光纤耦合扩束镜, 3 为平凸透镜, 4 为 Nd:YVO₄ 晶体, 5 为声光调 Q 晶体, 6 为倾角为 15° 的反射镜, 7 为 LBO 晶体 1, 8 为 LBO 晶体 2, 9 为后腔镜。

实验中采用的 LD 为北京大族天成半导体技术有限公司生产的光纤输出 LD 模块, 中心波长在 915 nm 左右, 线宽为 5.3 nm, 该模块最大输出功率为 65 W, 输出光纤纤芯直径为 105 μm, 数值孔径为 0.22。通过自制的光斑尺寸放大比例为 1:10 的耦合透镜端面泵浦 Nd:YVO₄ 晶体, 晶体尺寸为 1.8 mm×1.8 mm×20 mm, 掺杂浓度为 1%, 晶体两端镀有对波长为 915 nm 和 1064 nm 的光增透的膜层, 并使用导热胶将晶体粘接在铜热沉之中。利用 TEC 精确控温, 将温度控制在 25 °C, 控温精度 0.01 °C。谐振腔采用 V 型折叠腔, 谐振腔长约为 200 mm, 前腔镜为曲率半径为 500 mm 的平凸透镜, 平面镀有对波长为 915 nm 的光高透的膜层, 凸面镀有对波长为 915 nm 的光高透且对波长为 1064 nm 的光高反的膜层。后腔镜为平镜, 镀有对波长为 1064 nm 和 532 nm 的光高反的膜层。在图 2 中, 倾角为 15° 的反射镜的表面镀有对波长为 1064 nm 的光高反的膜层。在二倍频 LBO 晶体(LBO 晶体 2)中, 采用的是 I 类相位匹配, 晶体尺寸为 3 mm×3 mm×10 mm, 切割角度为 $\theta=90^\circ$, $\varphi=11.2^\circ$, 其中 θ 为切割方向与晶体 z 轴夹角, φ 为切割方向与晶体 x 轴夹角, 双端镀有对波长 1064 nm 和 532 nm 的光增透的膜层。在三倍频 LBO 晶体(LBO 晶体 1)中, 采用的是 II 类相位匹配, 晶体尺寸为 3 mm×3 mm×15 mm, 切割角度为 $\theta=42.8^\circ$, $\varphi=90^\circ$, S1 面镀有对波长 1064 nm 和 532 nm 的光增透的膜层, 对 S2 面进行布氏切割。将两块 LBO 晶体用铝箔包裹后置于铜热沉中, 并使用 TEC 精确控温, 控制 LBO 晶体 1 温度为 35 °C, 控制 LBO 晶体 2

温度为 38 °C, 控温精度为 0.01 °C。在谐振腔中, 使用的声光调 Q 晶体的通光方向长度为 10 mm, 在频率范围为 1~100 kHz 内, 利用中心频率为 40.68 MHz、射频功率为 20 W 的声光驱动电源对其进行驱动, 所用的声光调 Q 晶体以及声光驱动电源由中国电子科技集团第二十六所生产。值得注意的是, 对三倍频 LBO 晶体的 S2 面采用了布氏切割方式, 这样不仅可以利用 LBO 晶体的色散特性将腔内由非线性和频过程产生的波长为 355 nm 的紫外激光无损地导出来, 还增大了腔内激光光斑与 LBO 晶体表面的接触面积, 降低 LBO 晶体表面的激光功率密度, 有效提升了 LBO 晶体的抗损伤能力^[17]。因此, 在实验装置中无需专门在器件表面镀有与 355 nm 波长相关的膜层, 这有利于降低产品成本和提升产品可靠性, 这也是现在市面上中心波长为 355 nm 的全固态紫外激光器产品中的常用做法。

3 实验结果及分析

由于 Nd:YVO₄ 晶体在 915 nm 波长附近存在吸收系数低的问题, 因此需调整掺杂离子浓度和晶体长度来提高其对光的吸收效率, 进而使得输出的波长为 1064 nm 的红外激光达到预期效果。将尺寸为 1.8 mm×1.8 mm×20 mm, 掺杂浓度为 1% 的 Nd:YVO₄ 晶体作为激光晶体, 并测试了其对于 915 nm 泵浦光的吸收效率, 测试结果如图 3 所示。测试结果表明, 在当前实验条件下, 泵浦功率在 28~45 W 内, 能够保证 Nd:YVO₄ 晶体对波长为 915 nm 泵浦光的吸收效率在 80% 以上, 可满足实验要求。

图 4 为将中心波长为 915 nm 和 808 nm 的 LD 作为泵浦源时的红外激光对比实验结果。可以看

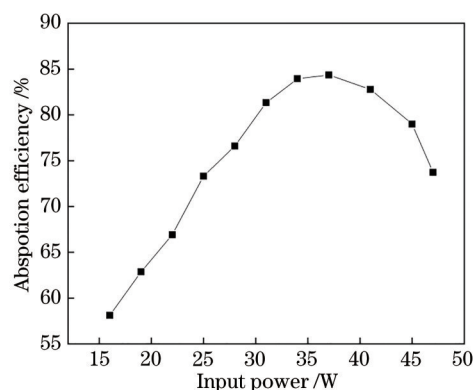


图 3 Nd:YVO₄ 晶体对波长为 915 nm 的泵浦光的吸收效率
Fig. 3 Absorption efficiency of Nd:YVO₄ crystal to pump light at wavelength of 915 nm

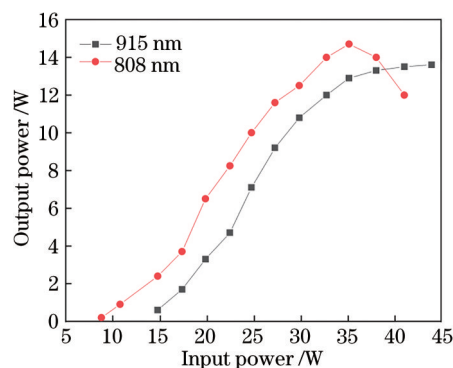


图 4 不同泵浦波长的红外激光对比
Fig. 4 Comparison of infrared laser with different pump wavelengths

出, 与将中心波长为 915 nm 的 LD 作为泵浦源相比, 当将中心波长为 808 nm 的 LD 作为泵浦源时, 产生的波长为 1064 nm 的红外激光的阈值更低, 光光转化效率更高, 这也是在掺 Nd³⁺ 离子激光晶体中常将中心波长为 808 nm 的 LD 作为泵浦源的主要原因。但是, 当将中心波长为 808 nm 的 LD 作为泵浦源时, 输出功率的饱和阈值在泵浦功率为 35 W 左右时便已达到, 且随着泵浦功率的提升, 紫外激光输出功率快速下降。当将中心波长为 915 nm 的 LD 作为泵浦源时, 输出功率的饱和阈值较大, 且在高泵浦功率时, 输出功率曲线较为平稳, 这对提升紫外激光器输出功率的稳定性有重大意义。

Nd:YVO₄ 晶体在室温下的吸收光谱曲线如图 5(a) 所示, 可以发现, 主要的吸收谱线峰在 808 nm 波长附近。因此, 当在此波长处泵浦时, 激光晶体吸收效率较高, 产生红外激光的泵浦阈值较低, 光光转化效率较高。这也是掺 Nd³⁺ 离子激光晶体通常会选用中心波长为 808 nm 的 LD 作为泵浦源的原因。其中, 横轴 λ 代表波长, 纵轴 $D(\lambda)$ 代表吸收系数。

Nd:YVO₄ 晶体的能级跃迁示意图如图 5(b) 所示。首先, 波长为 808 nm 的泵浦光将 Z₁ 能级上的粒子激发到 ⁴F_{5/2} 能级上。然后, 粒子通过无辐射跃迁的方式, 跃迁到 ⁴F_{3/2} 能级上。这个过程会产生大量的热, 这些热又会聚集在 Nd:YVO₄ 晶体中通光端面狭小的区域内, 进而形成焦距很小的热透镜。此外, 在 a 轴切割的 Nd:YVO₄ 晶体中, 其 b 轴与 c 轴在 808 nm 波长处的吸收系数和热膨胀系数有很大差异, 这不仅会影响腔内波长为 1064 nm 的基频激光的功率稳定性和激光指向稳定性, 还会在泵浦功率持续提高时, 促使晶体中产生很大的温度梯度, 引起过高的局部应力使得晶体产生应力破碎, 限制抽运功率的提

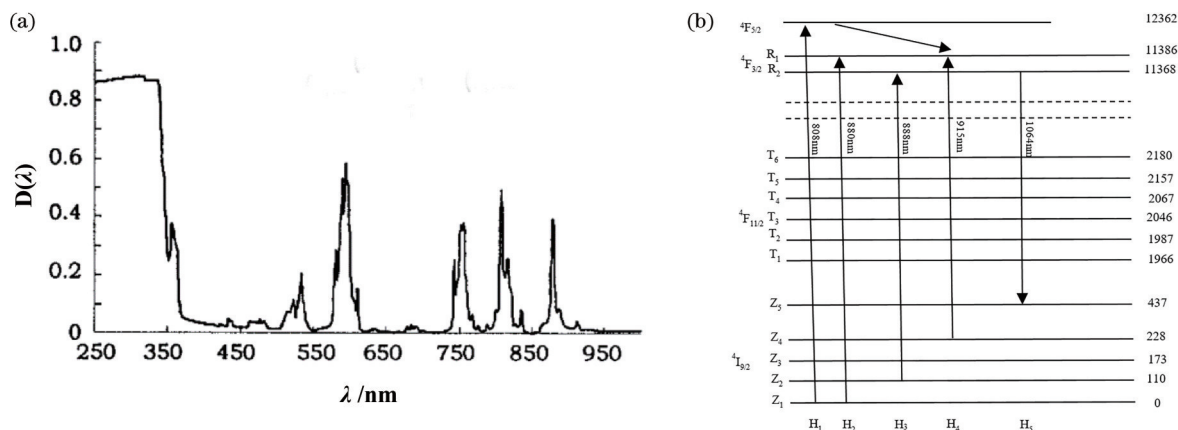


图 5 Nd:YVO₄晶体特性。(a) Nd:YVO₄晶体在室温下的吸收光谱^[18];(b) Nd:YVO₄晶体能级跃迁示意图^[13]

Fig. 5 Characteristics of Nd:YVO₄ crystal. (a) Absorption spectrum of Nd:YVO₄ crystal at room temperature^[18]; (b) schematic diagram of energy level transition in Nd:YVO₄ crystal^[13]

高,影响后续紫外激光器的输出功率的稳定性。

波长为 915 nm 的泵浦光将 Z₄ 能级上的粒子直接激发到 4F_{3/2} 能级的子能级 R₁ 上,避免了无辐射跃迁,从根本上降低了热量的产生。此外,Nd:YVO₄ 晶体在 915 nm 波长处的吸收系数较低,呈现非偏振吸收特性。这使得废热不会聚集在晶体端面的小区域内,在晶体内部分布较均匀,进而将中心波长为 915 nm 的 LD 作为泵浦源时,会较晚达到饱和阈值。在该情况下,低功率的紫外激光器会运行在远离饱和阈值的区域,进而能够长时间稳定运行。

图 6 给出了中心波长为 915 nm 的泵浦端面泵浦中心波长为 355 nm 的全固态紫外激光器的输出功率-输入功率曲线。采用声光调 Q 的方式,当重复频率为 30 kHz,泵浦功率为 45 W 时,获得了稳定输出的功率为 3.7 W 的紫外激光,输出激光脉冲宽度约为 13 ns,光束质量因子 M² 小于 1.2,光光转化效率约为 8.2%,发散角小于 2 mrad。图 7 为中心波长为 355 nm 的紫外激光器的输出脉冲形状。图 8 为

中心波长为 355 nm 的紫外激光器的输出激光,可以看出,激光光斑圆度较佳,这有利于后续的紫外激光加工。图 9 为输出功率稳定性测试,测试时间为 6 h。

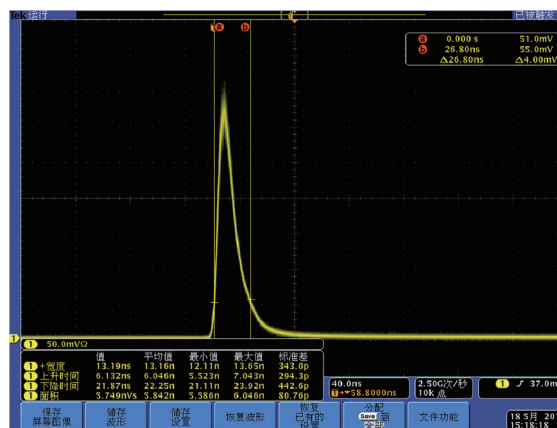


图 7 中心波长为 355 nm 的紫外激光器的输出脉冲形状
Fig. 7 Output pulse shape of ultraviolet laser with center wavelength of 355 nm

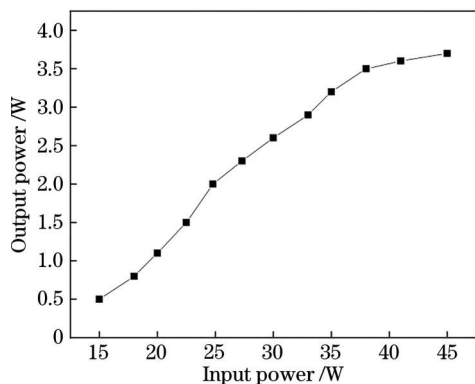


图 6 输出功率随输入功率的变化

Fig. 6 Variation of output power with input power

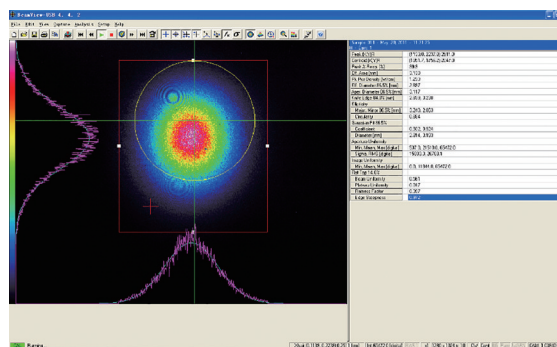


图 8 中心波长为 355 nm 的紫外激光器的输出激光光斑
Fig. 8 Output laser spot of ultraviolet laser with center wavelength of 355 nm

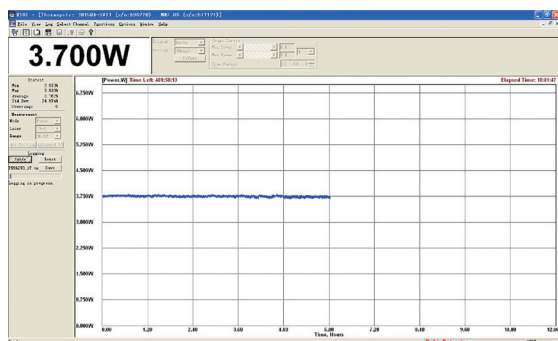


图 9 中心波长为 355 nm 的紫外激光器在 6 h 内的功率稳定性测试

Fig. 9 Power stability test of ultraviolet laser with center wavelength of 355 nm within 6 hours

最终,可以发现,在采用 V 型折叠腔的中心波长为 355 nm 的全固态紫外激光器中, Nd:YVO₄ 晶体的热透镜效应是影响激光器性能的关键因素之一。严重的热透镜效应不仅会限制泵浦功率的提升,还会影响腔内波长为 1064 nm 的基频激光的功率稳定性和指向稳定性。然而,在非线过程中,尤其是激光和频过程,对参与其中的波长为 1064 nm 和 532 nm 的激光的功率和指向要求很高。波长为 1064 nm 的基频激光的功率和指向不稳定便会导致在后续两块 LBO 晶体中发生的非线性过程变得不稳定,进而激光器的输出功率不稳定且腔内晶体易被腔内激光产生的强点损坏。

4 结 论

市场上的紫外激光器尤其是国产紫外激光器的激光功率输出稳定性和使用寿命有待提高,并且紫外激光器的成本竞争也是现在市场竞争的关键因素之一。因此,在降低生产成本的同时,提升激光器的稳定性能和使用寿命是现在各厂家研究的主要方向,而提升对激光晶体的热透镜管理能力又是其中的核心。对此,国内外厂家主要通过改进工艺、改进晶体散热方式,以及精密设计晶体热沉夹具以减小晶体热应力的方式来提升激光晶体对热透镜的管理能力,进而满足输出功率稳定性的要求,但是这些工艺技术的研发和生产成本往往较高。因此,通过减少量子亏损来减少废热产生的方法受到了研究人员的广泛关注。设计了利用中心波长为 915 nm 的 LD 泵浦中心波长为 355 nm 的全固态紫外激光器方案,为解决上述问题提供了新的思路。

实验结果表明,利用中心波长为 915 nm 的 LD 泵浦中心波长为 355 nm 的全固态紫外激光器可以

达到市场对于低功率紫外激光器的要求。同时,利用中心波长为 915 nm 的 LD 直接泵浦 Nd:YVO₄ 晶体生成中心波长为 355 nm 紫外激光的方案具有激光输出功率稳定性高、成本低的特点。

参 考 文 献

- [1] Bruneau D, Pelon J, Blouzon F, et al. 355-nm high spectral resolution and doppler lidar LNG[J]. Applied Optics, 2015, 54(29): 8776-8785.
- [2] Itoh S, Sakakura M, Shimotsuma Y, et al. Generation of glass nanofibers from back surface of substrate using pulsed UV 355 nm laser[J]. Applied Physics B, 2015, 119(3): 519-524.
- [3] Ryoo K, Kim M, Sung J, et al. Mask less laser direct imaging lithography using a 355-nm UV light source in manufacturing of flexible fine dies[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29(1): 365-370.
- [4] Tan C Q, Zheng Q, Xue Q H, et al. LD end pumped Nd:YAG out cavity fourth harmonic generation high power ultraviolet laser[J]. Laser & Infrared, 2005, 35(7): 490-492.
谭成桥, 郑权, 薛庆华, 等. LD 端泵 Nd:YAG/Cr:YAG 腔外变频产生高功率紫外[J]. 激光与红外, 2005, 35(7): 490-492.
- [5] Zhang J, Fan Z W, Qi Y, et al. Efficient intracavity dispersion Q CW Nd:YAG UV laser[J]. Journal of Optoelectronics·laser, 2006, 17(12): 1474-1476.
张晶, 樊仲维, 亓岩, 等. 高效腔内色散调 Q Nd:YAG 紫外激光器[J]. 光电子·激光, 2006, 17(12): 1474-1476.
- [6] Zhang Y F, Wang Y Q, Ma Y, et al. LD end pumped all-solid-state UV lasers[J]. Laser & Infrared, 2007, 37(12): 1262-1264.
张玉峰, 王运谦, 马莹, 等. LD 端泵全固化紫外激光器[J]. 激光与红外, 2007, 37(12): 1262-1264.
- [7] Liu Q, Yan X P, Chen H L, et al. New progress in high-power all-solid-state ultraviolet laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(9): 2289-2298.
柳强, 闫兴鹏, 陈海龙, 等. 高功率全固态紫外激光器研究新进展[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2289-2298.
- [8] Hu A L, Guo Q, Wu B, et al. LD pumped 355-nm quasi-CW ultraviolet laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(7): 1810-1814.
胡爱兰, 郭强, 吴边, 等. LD 抽运 355-nm 准连续紫外激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1810-1814.

- [9] Li B, Yao J Q, Ding X, et al. High efficiency extra-cavity frequency conversion UV laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(2): 290-292.
李斌, 姚建铨, 丁欣, 等. 高效腔外频率变换紫外激光器[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(2): 290-292.
- [10] Li T, Zhuo Z, Li X M, et al. Study on optical characteristics of Nd:YVO₄/YVO₄ composite crystal laser[J]. Chinese Optics Letters, 2007, 5(3): 175-177.
- [11] McDonagh L, Wallenstein R, Knappe R, et al. High-efficiency 60 W TEM₀₀ Nd:YVO₄ oscillator pumped at 888 nm[J]. Optics Letters, 2006, 31(22): 3297-3299.
- [12] McDonagh L, Wallenstein R. Low-noise 62 W CW intracavity-doubled TEM₀₀ Nd:YVO₄ green laser pumped at 888 nm[J]. Optics Letters, 2007, 32(7): 802-804.
- [13] Zhai P. Research on 914 nm direct pumped Nd:YVO₄ laser[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013: 33-39.
翟霏. 914 nm 直接泵浦 Nd:YVO₄ 激光器的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2013: 33-39.
- [14] Liu Q, Nie M M, Lu F Y, et al. High-power, wavelength-locked 878.6 nm in-band pumped, acoustically Q-switched Nd:YVO₄ MOPA laser with TEM₀₀ mode[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(4): 1-9.
- [15] Li B, Lei P, Sun B, et al. Efficient Nd:YVO₄ laser in-band pumped by wavelength-locked 913.9-nm laser diode and Q-switch operation[J]. Chinese Physics B, 2017, 26(2): 024206.
- [16] Ma S Y, Zhang W Y, Qiu J X, et al. Review on technology development of high power CW fiber laser [J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2019(5): 1-6, 34.
马思焯, 张闻宇, 邱佳欣, 等. 高功率连续光纤激光器技术发展概述[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2019(5): 1-6, 34.
- [17] Zhang L J. Research on ultraviolet laser output of Brewster angle[D]. Jinan: Shandong University, 2018: 6-7.
张立杰. 布鲁斯特角输出的紫外激光器研究[D]. 济南: 山东大学, 2018: 6-7.
- [18] Guo L H, Yang W Q, Yang J J, et al. Comparison for the structure and spectral properties of Nd:YVO₄, Nd:KYW crystals[J]. Journal of Fujian Normal university (Natural Science Edition), 2008, 24(1): 50-54.
郭丽花, 杨文琴, 杨俊杰, 等. 掺 Nd³⁺ 的 YVO₄、KYW 晶体结构与吸收光谱性能研究比较[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2008, 24(1): 50-54.