

基于 LBO 的高功率飞秒绿光抽运的光学参量振荡器

范锦涛 胡明列 顾澄琳 刘博文 宋有建 王清月

(天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 天津 300072)

摘要 三硼酸锂(LBO)具有良好的非线性光学特性和极其稳定的物化性能,其色散量对晶体温度变化敏感,是可实现非临界相位匹配的优良的非线性光学晶体。报道了高功率绿光飞秒激光同步抽运以三硼酸锂(LBO)为非线性晶体的单共振光学参量振荡器(OPO)。抽运源为高平均功率大模场面积掺镱光子晶体光纤飞秒激光器放大级的输出飞秒光的锁模倍频激光,通过调节晶体温度,采用非临界相位匹配方式,获得了红光至近红外光可调谐的高功率飞秒激光,OPO的信号光调谐范围为670~880 nm,相应闲频光在2320~1270 nm范围内可调。在3.4 W抽运功率下,中心波长为694 nm的信号光输出获得最高平均功率为660 mW,脉冲宽度为132 fs,转换效率为19.4%。

关键词 非线性光学;光学参量振荡器;三硼酸锂;光纤飞秒激光器

中图分类号 O437 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0902009

High Power Femtosecond Green-Pumped Optical Parametric Oscillator Based on Lithium Triborate

Fan Jintao Hu Minglie Gu Chenglin Liu Bowen Song Youjian Wang Qingyue

(Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract Lithium triborate (LBO) possesses desirable nonlinear optical characters, as well as stable chemical and mechanical properties. Its dispersion is sensitive to the change of the crystal temperature, which allows this nonlinear optical crystal to be used to achieve noncritical phase matching. This paper demonstrates a femtosecond synchronous green-pumped singly resonant optical parametric oscillator (OPO) based on lithium triborate. As the pump source, a frequency-doubled mode-locked Yb-fiber laser-amplifier system is used, which can produce femtosecond laser with high average power and large mode field area. By adjusting crystal temperature, tunable high power femtosecond laser can be obtained from red to near infrared using noncritical phase matching method. The signal pulses of the optical parametric oscillator have a wide spectral tuning range of 670~880 nm and idler pulses are tunable in the range of 2320~1270 nm. At a pump power of 3.4 W, the output highest average power of 660 mW at 694 nm central wavelength is achieved with the pulse duration of 132 fs and the slope efficiency of 19.4%.

Key words nonlinear optics; optical parametric oscillator; lithium triborate; femtosecond fiber lasers

OCIS codes 190.4410; 060.4370; 140.3515

1 引 言

近年来,飞秒光学参量振荡器(OPO)作为宽带可调谐激光源得到了迅速发展,广泛应用于光谱学、生物医药学及环境监测等领域^[1-2]。钛宝石激光器作

为 OPO 常用抽运光源早已商用化,但是由于受固体激光器热效应的影响,其输出平均功率一般在 2.5 W 以下,大大限制了其抽运的 OPO 的平均输出功率^[3]。而光纤飞秒激光放大系统是可以输出高平均功率的

收稿日期:2014-02-24;收到修改稿日期:2014-04-22

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2011CB808101,2010CB327604)、国家自然科学基金(61322502,61205131,11274239)

作者简介:范锦涛(1990—),男,硕士研究生,主要从事超短脉冲技术、非线性光学等方面的研究。

E-mail: fjtruth@tju.edu.cn

导师简介:胡明列(1978—),男,博士生导师,主要从事飞秒激光技术、光子晶体光纤、超短脉冲光纤激光器及放大器等方面的研究。E-mail:huminglie@tju.edu.cn(通信联系人)

飞秒激光系统,是实现高平均功率可调谐光源的一个重要抽运光源^[4-6]。三硼酸锂(LBO)具有高破坏阈值和优良的光谱透射特性,并且可以实现非临界的温度相位匹配,可通过调节晶体温度实现宽带可调谐激光输出。近些年报道的LBO-OPO多为皮秒、纳秒量级,飞秒激光抽运LBO-OPO报道较少^[7-11]。Kafka等^[12-15]利用钛宝石激光器输出光作为抽运光,LBO作为OPO非线性晶体,获得550 mW、40 fs的信号光,接着使用Nd:YVO₄激光器输出激光的倍频绿光作为抽运源,获得270 fs的信号光,在实验过程中Kafka指出,由于受LBO自身截止波长的限制,使用钛宝石激光器抽运只能获得1100~2600 nm可调谐输出,而采用倍频绿光作为抽运光,可输出660~2600 nm可调谐输出,覆盖范围更广。2011年Clegg等^[14]使用掺Yb³⁺光纤飞秒激光器输出光的倍频光抽运LBO-OPO,获得780~940 nm可调谐激光输出,平均输出功率约250 mW。近年来光子晶体光纤激光器飞速发展,可以实现更高功率激光输出^[13],同时该光纤具有无截止单模运转和大模场特性,可以克服由激光功率密度过高引起的非线性效应对高功率系统的限制,使用光子晶体光纤飞秒放大系统输出作为抽运源,可使OPO系统获得高功率输出。

本文采用大模场面积光子晶体光纤激光放大系

统输出1040 nm的倍频绿光作为抽运光,搭建了基于LBO晶体的光学参量振荡器,获得670~880 nm信号光输出,在抽运光平均功率为3.4 W时,中心波长为694 nm处获得最高平均功率输出为660 mW,脉宽为132 fs,转换效率可达19.4%。

2 实验装置及结果

实验装置如图1所示,OPO抽运光为锁模掺Yb³⁺大模场面积光子晶体光纤飞秒激光放大器输出激光的倍频光。该飞秒激光器输出激光中心波长为1040 nm,重复频率为55 MHz,脉冲宽度为81 fs,其时间带宽积为0.45。PBS为偏振分束器,SHG为二次谐波发生器。L1($f=50$ mm)和L2($f=90$ mm)为聚焦透镜,对倍频晶体提供聚焦准直作用。由于LBO较BBO晶体有更大的接收角,这有利于获得较好基模模式的倍频光,倍频时使用3 mm长LBO晶体,切割角 $\theta=12.9^\circ$ 、 $\Phi=90^\circ$,采用I类相位匹配($o+o\rightarrow e$)。实验中抽运基频光1040 nm处激光输出功率为8.2 W,通过倍频产生中心波长为520 nm绿光3.4 W,倍频效率为41.4%,倍频光和基频光群速度走离约为200 fs,因此绿光脉宽估算约为280 fs。残留抽运光通过双色镜输出,以免对实验产生影响。

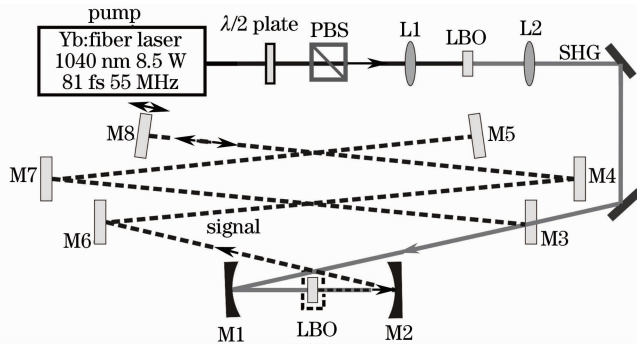


图1 LBO-OPO光学参量振荡器装置

Fig. 1 LBO-OPO optical parametric oscillator setup

OPO谐振腔为单谐振线形腔,由一组凹面镜(M1和M2)和6个平面镜组成。凹面镜M1和M2曲率半径 $r=150$ mm,为OPO非线性晶体提供聚焦,对650~1100 nm高反,平面镜M5和M8为该腔的端镜,其余平面镜(M3、M4、M6、M7)为折叠光路,使OPO腔长与激光器腔长相匹配。其中M8为信号光输出耦合镜(OC),实验时其输出率可选为3%、8%、15%。M3对520 nm处光透射率高于99%,对650~1100 nm高反,其余平面镜均对650~1100 nm高反,对520 nm处光透射率为85%。

实验中将M8置于平移台上,以便调整OPO腔长使其与激光器腔长一致而实现同步。LBO具有良好的非线性光学特性和极其稳定的物化性能,其色散量对温度变化敏感,是优良的非临界相位匹配的非线性光学晶体,相比BBO晶体角度相位匹配,可以获得更好模式的光斑输出、更高的输出功率。实验中选用4 mm长的LBO,切割角 $\theta=0^\circ$ 、 $\Phi=90^\circ$,采用I类($o+o\rightarrow e$)非临界相位匹配。晶体两端镀有中心波长为800 nm增透膜,实验中LBO晶体放置在特制温控炉中进行温度控制,其温度调谐范围为室

温到 200 ℃,温控精度为 0.1 ℃。

3 实验结果及其分析

实验中使用偏振分束片与半波片来调节进入光学参量振荡器的抽运光功率大小,当抽运绿光功率为 2.8 W 时,信号光波长随晶体温度变化曲线如图 2(a)所示,使用温控炉调节晶体温度为 130 ℃~190 ℃(温度变化间隔为 2 ℃),可实现信号光 670~880 nm 连续可调谐输出,对应闲频光为 2322~

1271 nm。使用 15% 输出耦合镜,在各个温度条件下,通过调节凹面镜 M2 及端镜 M5 和 M8 使得输出脉冲最优化,可获得各个温度下对应波长处最大平均输出功率,结果如图 2(b)所示。从图 2 可以看出其输出最大平均功率在温度为 140 ℃,波长为 694 nm 处获得。此结果与理论值存在一定的误差,这是由于使用温控炉加热晶体时,晶体温度与温控炉温度存在 20 ℃ 的温度差值,造成了实验数据与理论值之间的误差^[14]。

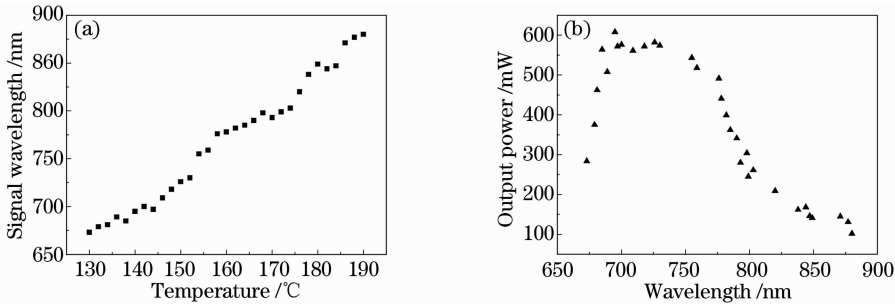


图 2 (a) OPO 输出波长随晶体温度的变化曲线; (b) 信号光平均功率随波长的变化曲线

Fig. 2 (a) Curve of OPO output wavelength with temperature; (b) curve of average signal power with wavelength

将晶体温度固定在 140 ℃,分别测量不同抽运功率下输出率为 3%、8%、15% 的输出耦合镜输出信号光平均功率,相应抽运功率在绿光进入 OPO 之前测量,由于晶体表面反射损耗和反射镜损耗,故晶体中实际抽运功率小于测量值。OPO 腔的效率由腔内损耗、非线性增益和输出耦合效率共同决定。测量结果如图 3(a)所示,OPO 振荡阈值分别为 3% 输出时的 261 mW,8% 输出时 345 mW,和 15% 输出时的 421 mW,可以看出,阈值功率变化不大,这是由于腔损耗较大,输出率变化对总损耗的影响较小,所以当输出从 3% 变化到 15% 时,阈值增大,但变化幅度不大。同时可以看出斜效率由输出耦合为 3% 时的 7.8% 增大到输出耦合为 15% 时的 22%。当抽运光功率为 3.4 W 时,采用 15% 输出耦合镜可

获得最大输出平均功率为 660 mW 的信号光输出。

对于超短脉冲的光学参量振荡器,由于抽运光的光谱较宽,同一温度下,信号光仍有较宽的相位匹配带宽,因而在接下来的实验中通过微调 M8 改变 OPO 运转腔长,来实现不同中心波长处信号光的振荡。将抽运功率固定在 2.8 W,晶体温度固定在 140 ℃,使用 15% 的输出耦合镜,通过调节平移台调节 OPO 腔长,对应信号光波长及功率随延时的变化如图 3(b)所示,可以看出,信号光波长可实现 682~772 nm 范围内调谐,最高输出平均功率在 694 nm 处获得为 608 mW,其时间带宽积范围为 0.66~0.69。

由于 LBO 本身的色散及其腔镜色散特性,在谐振腔总色散曲线比较平坦的信号光波长处,输出信

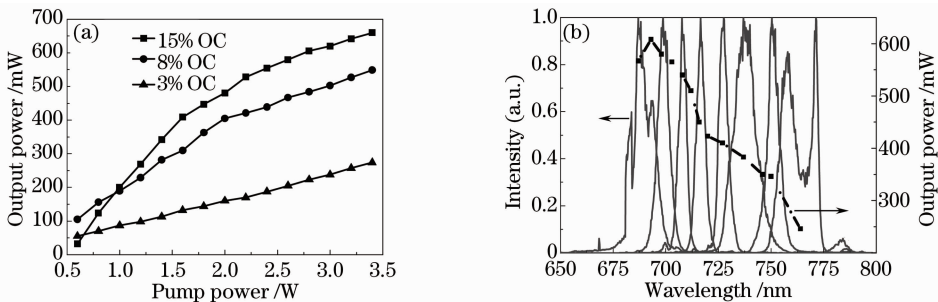


图 3 (a) 不同输出耦合率下,输出信号光平均功率随抽运功率的变化曲线; (b) 信号光波长随延时及功率随波长变化曲线

Fig. 3 (a) Average signal power versus pump power with different output coupling efficiencies; (b) signal wavelength versus time delay and power versus wavelength

号光的带宽较宽,从而使得波长 762 nm 处信号光的带宽比波长 693 nm 处信号光带宽大。实验结果与理论相吻合,实验中绿光抽运源中心波长为 520 nm,光谱宽度为 6 nm,输出信号光光谱宽度在

短波 693 nm 处为 8 nm,调节腔长获得中心波长为 762 nm 时,其光谱宽度为 17 nm,对应脉宽由 132 fs 变为 78 fs,其自相关测量曲线如图 4(a)所示,对应光谱如图 4(b)所示。

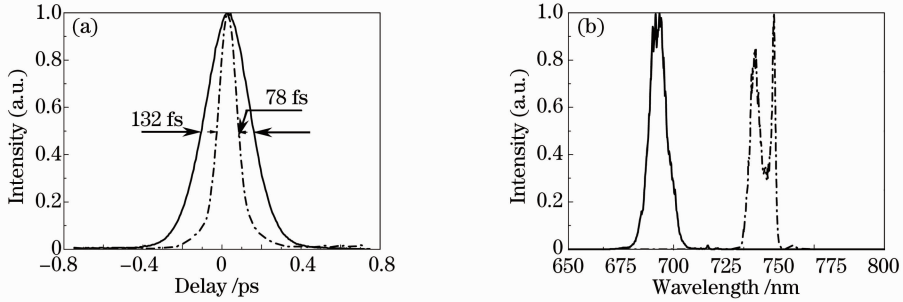


图 4 OPO 输出脉冲时域及谱域特性。(a) 自相关曲线; (b) 对应光谱曲线

Fig. 4 Time domain and spectral domain features of OPO output pulse. (a) Autocorrelation curves; (b) corresponding spectral curves

4 结 论

设计了基于飞秒的绿光抽运 LBO 晶体的光学参量振荡器,采用非临界相位匹配方式,获得了 670~880 nm 连续可调谐信号光输出,相应闲频光为 2320~1270 nm,在晶体温度为 140 °C,抽运功率为 3.4 W 时,获得最高输出平均功率为 660 mW 的信号光,其中心波长为 694 nm,脉宽为 132 fs。同时,晶体温度在 130 °C~190 °C 范围内调节时,获得 670~880 nm 连续可调谐激光;保持晶体温度 140 °C 不变时,由于超短脉冲宽光谱特性,飞秒 OPO 具有宽带相位匹配特性,通过调节延时改变腔长,可获得 682~772 nm 激光输出,实现了高功率可调谐红光至近红外飞秒激光输出。进一步提高光纤激光器基频光的功率可以提高抽运的绿光功率,从而获得瓦量级信号光输出,并且可以结合腔内和频、倍频效应获得高功率可调谐紫外激光的输出,可用来作生物光子学和纳米材料检测等方面的研究。

参 考 文 献

- 1 Ruebel F, Haag P, L'huillier J A. Synchronously pumped femtosecond optical parametric oscillator with integrated sum frequency generation[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(1): 011122.
- 2 Zumbusch A, Holtom G R, Xie X S. Three-dimensional vibrational imaging by coherent anti-Stokes Raman scattering[J]. Physical Review Letters, 1999, 82(20): 4142-4145.
- 3 Limpert J, Roser F, Schreiber T, et al.. High-power ultrafast fiber laser systems[J]. Selected Topics in Quantum Electronics, 2006, 12(2): 233-244.
- 4 Wu Bo, Cai Shuangshuang, Shen Jianwei, et al.. Widely tunable optical parametric oscillators based on periodically poled MgO doped LiNbO₃[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(5): 2684-2688.

吴波,蔡双双,沈剑威,等. 基于镁掺杂的周期性畴反转铌酸

锂的宽调谐光参量振荡器[J]. 物理学报, 2007, 56(5): 2684-2688.

- 5 Liu Bowen, Hu Minglie, Song Youjian, et al.. Sub-100 fs high power Yb-doped single polarization large-mode-area photonic crystal fiber laser amplifier[J]. Acta Phys Sinica, 2008, 57(11): 6921-6925.
- 刘博文,胡明列,宋有建,等. 亚百飞秒高功率掺镱大模面积光子晶体光纤飞秒激光放大器的实验研究[J]. 物理学报, 2008, 57(11): 6921-6925.
- 6 Jauregui C, Eidam T, Otto H J, et al.. Physical origin of mode instabilities in high-power fiber laser systems [J]. Optics Express, 2012, 20(12): 12912-12925.
- 7 Butterworth S D, Girard S, Hanna D C. High-power, broadly tunable all-solid-state synchronously pumped lithium triborate optical parametric oscillator[J]. JOSA B, 1995, 12(11): 2158-2167.
- 8 Hall G J, Ebrahimzadeh M, Robertson A, et al.. Synchronously pumped optical parametric oscillators using all-solid-state pump lasers[J]. JOSA B, 1993, 10(11): 2168-2179.
- 9 Tukker T W, Otto C, Greve J. Design, optimization, and characterization of a narrow-bandwidth optical parametric oscillator[J]. JOSA B, 1999, 16(1): 90-95.
- 10 Kieu K, Saar B G, Holtom G R, et al.. High-power picosecond fiber source for coherent Raman microscopy[J]. Optics Letters, 2009, 34(13): 2051-2053.
- 11 Jurna M, Korterek J P, Offerhaus H L, et al.. Noncritical phase-matched lithium triborate optical parametric oscillator for high resolution coherent anti-Stokes Raman scattering spectroscopy and microscopy[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(25): 251116.
- 12 Kafka J D, Watts M L, Pieterse J W. Synchronously pumped optical parametric oscillators with LiBO₃[J]. JOSA B, 1995, 12(11): 2147-2157.
- 13 Kafka J D, Watts M L, Pieterse J W, et al.. Mid-infrared pulse generation using a sub-picosecond OPO[J]. Applied Physics B, 1995, 60(5): 449-452.
- 14 Cleff C, Epping J, Gross P, et al.. Femtosecond OPO based on LBO pumped by a frequency-doubled Yb-fiber laser-amplifier system for CARS spectroscopy[J]. Applied Physics B, 2011, 103(4): 795-800.
- 15 Fang Xiaohui, Hu Minglie, Liu Bowen, et al.. An all-photonic-crystal-fiber wavelength-tunable source of high-energy sub-100 fs pulses[J]. Optics Communications, 2012, 289: 123-126.

栏目编辑:史敏