

绿光泵浦的黄光波段可调谐窄线宽光学参量振荡器

张鹏泉¹, 项铁铭^{1*}, 史屹君²

(1. 杭州电子科技大学 电子信息学院, 浙江 杭州 310018;
2. 天津可宏振星科技有限公司, 天津 300192)

摘要: 为实现波长可调谐的窄线宽黄光波段激光输出, 设计搭建了以倍频声光调 Q Nd:YAG 激光器的 532 nm 脉冲绿光输出为泵浦源、以 II 类相位匹配磷酸钛氧钾 (KTP) 晶体为非线性介质的折叠腔光学参量振荡器 (OPO)。首先产生腔内振荡的近红外可调谐闲频光, 在此基础上基于 LBO 晶体 I 类非临界相位匹配方式对 OPO 的闲频光进行内腔倍频, 得到波长调谐范围 587.2~595.2 nm 的黄光波段输出。为改善 OPO 光谱特性, 在 OPO 闲频光谐振腔内插入熔融石英标准具, 有效压缩了 OPO 输出黄光的光谱线宽。绿光泵浦源脉冲重复频率 10 kHz、平均功率 24.0 W 下在波长 591.2 nm 处获得了最高黄光输出功率 2.89 W, 光束质量因子 $M^2=3.4$, 从 532 nm 泵浦光到黄光输出的转换效率为 12.0%, 脉冲宽度 37 ns, 对应峰值功率 7.8 kW。此时黄光光谱半高全宽为 0.15 nm, 相比未在 OPO 腔内插入标准具自由运转状态下的光谱得到明显改善。

关键词: 光学参量振荡器; 可调谐激光; 窄线宽激光

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200275

Green pumped yellow wavelength tunable narrow linewidth optical parametric oscillator

Zhang Pengquan¹, Xiang Tieming^{1*}, Shi Yijun²

(1. School of Electronics and Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;
2. Tianjin Bright Star Technology Co., LTD, Tianjin 300192, China)

Abstract: A pulsed optical parametric oscillator (OPO) was demonstrated for the purpose of wavelength-tunable yellow output with narrow spectral line width. The OPO pumped by the green output of an acousto-optic Q-switched Nd:YAG used a type II phase-matched KTiOPO_4 (KTP) crystal as the nonlinear gain medium and a folded cavity arrangement. The OPO was designed to have the idler wave tunable in near infrared oscillated in the cavity, which was further frequency doubled to generate the wavelength-tunable yellow output by using a LiB_3O_5 (LBO) crystal with type I non-critical phase matching scheme. A fused silica etalon was inserted in the idler wave cavity to narrow the idler wave and the resultant yellow spectral line width. The wavelength of the yellow output obtained could be tuned over 587.2-595.2 nm, within which the maximum average output power of 2.89 W was obtained at 591.2 nm, under an incident average green pump power of 24.0 W. The beam quality factor M^2 was 3.4. The conversion efficiency from the green pump to the yellow output was 12.0%. The pulse width at the maximum output power was 37 ns, and the peak power was 7.8 kW. The spectral line width of the yellow output was 0.15 nm, which was narrowed effectively compared with that without etalon in the OPO cavity.

Key words: optical parametric oscillator; tunable laser; narrow linewidth laser

收稿日期: 2020-06-15; 修订日期: 2020-07-11

作者简介: 张鹏泉 (1976-), 男, 正高级工程师, 硕士, 主要从事光电信号探测和对抗方向的研究工作。Email: zhpq1999@163.com

通讯作者: 项铁铭 (1976-), 男, 副教授, 博士, 主要从事微波电路的研究工作。Email: tmxiang@hdu.edu.cn

0 引言

波长位于 570~630 nm 附近的黄-红波段可调谐激光光源在光谱、医疗、国防等领域具有诸多重要应用^[1-2]。传统上,该波段的可调谐输出多由染料激光器产生,但染料激光器的体积和安全性在很大程度上限制了其应用。近年来掺镨(Pr^{3+})和掺铽(Tb^{3+})等激活离子的激光增益介质不断涌现^[3-4],能够实现该波段的激光输出,但相关新型激光晶体的机械性能、热性能以及发光性能仍难以支撑高功率高光束质量的输出,波长调谐能力也非常有限。因此,受激拉曼散射(stimulated Raman scattering, SRS)和光学参量振荡器(Optical parametric oscillator, OPO)等非线性光学频率变换技术是目前实现可调谐全固态黄-红波段可调谐激光的主流技术途径^[1-2, 5-9],其中 OPO 可通过相位匹配条件的控制实现波长的宽带调谐,在波长调谐能力上具有明显的优势,应用更为广泛,也是文中产生黄-红波段可调谐输出的技术手段。

在连续波(continuous-wave, CW)运转以及微焦(μJ)量级的低能量脉冲可见光 OPO 方面,往往采用具有极高有效非线性系数的周期极化铌酸锂(periodically-poled lithium niobate, PPLN)和周期极化钽酸锂(periodically-poled lithium tantalite, PPLT)等准相位匹配(quasi-phase-matching, QPM)晶体实现高转换效率。例如 My 等人利用 CW 绿光泵浦 $\text{MgO}:\text{PPLN}$ 外腔 OPO,并用偏硼酸钡(BBO)晶体对闲频光内腔倍频产生最高 300 mW 的 585~678 nm 可调谐单纵模输出^[1]; Bäder 等人利用被动调 Q 倍频 Nd:YAG 激光器的单纵模 532 nm 绿光泵浦 PPLN,产生最高 593~637 nm 的可调谐信号光输出,627 nm 处最高能量 13 μJ ,转换效率 23%^[2]。对于面向高能量和高峰值功率应用的脉冲运转的可见光 OPO 来说,PPLN 和 PPLT 等非线性介质的损伤阈值较低,不能满足相关的能量和峰值功率需求,因此,多采用 BBO、三硼酸锂(LBO)以及磷酸钛氧钾(KTP)等块状晶体作为非线性介质;而其实现方法上,多使用 355 nm 的紫外激光泵浦,以直接产生宽调谐的可见光输出,例如 Bapna 等人报道的 BBO OPO,角度波长调谐范围 420~670 nm,最低阈值 0.5 mJ,3.7 mJ 泵浦能量下输出能

量 1.2 mJ^[5]; Rao 等人报道波长调谐范围 490~630 nm,最高平均功率 2.6 W、脉冲重复频率 5 kHz 的 BBO OPO 等^[6]。355 nm 紫外泵浦尽管能够实现宽波长调谐范围,但使用紫外泵浦源也存在很多问题,特别是紫外泵浦源的成本以及长时间高功率紫外辐照下激光器的稳定性和寿命等不可避免的因素。因此,532 nm 绿光泵浦下对近红外闲频光倍频的 OPO 成为对调谐范围要求不甚苛刻时折中的方案,如 Li 等人采用绿光泵浦 LBO-OPO 获得波长调谐范围 924~970 nm 的信号光输出,其闲频光具有倍频获得黄-红波段输出的潜力^[7]; Bo 等人则报道了 18 W 绿光泵浦下产生 9.3 W 近红外信号光输出的实验结果,转换效率高达 54%^[8]; Sun 等人在 KTP-OPO 腔内加入第二块 KTP 晶体闲频光倍频,得到调谐范围 573~578 nm 的黄光输出,但闲频光谱的半高全宽达到了 0.6 nm^[9]。

文中,笔者设计实现了 532 nm 绿光作为泵浦光、非临界匹配 LBO 作为非线性晶体的波长可调谐外腔 OPO,并在 OPO 闲频光谐振腔内插入标准具压缩其线宽;利用 KTP 晶体对可调谐闲频光内腔倍频,产生了波长调谐范围 587.2~595.2 nm 的可见光输出,其中脉冲重复频率 10 kHz、输出波长 591.2 nm 时最高平均输出功率 3.12 W,光光转换效率 13.0%,为改善 OPO 的光谱特性,在 OPO 闲频光谐振腔内插入标准具,获得了平均功率 2.89 W、光谱线宽 0.15 nm 的窄线宽输出,最高输出功率时光束质量因子 $M^2=3.4$ 。

1 实验装置

实验光路如图 1 所示,532 nm 泵浦光为声光调 Q Nd:YAG 激光器的二次谐波输出,脉冲重复频率 10 kHz,脉冲宽度 50 ns,最高平均功率 27 W,对应峰值功率 54 kW,光束质量因子 $M^2=4.3$,使用光谱仪 Ocean Optics USB2000 测得其光谱线宽小于仪器分辨率 0.12 nm(半高全宽,FWHM)。使用半波片调整其偏振方向至平行于台面后,经聚焦透镜组入射 OPO 非线性晶体 KTP,泵浦光斑半径 150 μm 。平面镜 M1,曲率半径(radius of curvature, ROC)100 mm 的凹面镜 M2,以及平面镜 M3 构成 V 形折叠的 OPO 闲频光谐振腔,其中 M1 镜双面镀 532 nm 增透膜($T\sim 93\%$),单面镀 1 120~1 300 nm 高反膜($R>99.5\%$); M2

镜凹面镀 1100~1300 nm 高反膜 ($R>99\%$), 双面镀 560~630 nm 增透膜 ($T\sim 91\%$); M3 镜镀 1100~1300 nm 高反 ($R>99.5\%$) 和 560~630 nm 高反 ($R>95\%$) 膜。所用 OPO 非线性晶体 KTP 晶体尺寸 5 mm×5 mm×20 mm, 切割角度为 $\theta=74.4^\circ$ 、 $\varphi=0^\circ$, 对应 20 °C 下闲频光波长 1180 nm 的 II 类相位匹配 ($o\rightarrow e+o$), 晶体两端镀 532 nm 以及 900~1030 nm 和 1100~1300 nm 增透膜; 用于振荡闲频光内腔倍频的 LBO 晶体尺寸为 4 mm×4 mm×30 mm, 采用 $\theta=90^\circ$ 、 $\varphi=0^\circ$ I 类非临界相位匹配 ($e\rightarrow o+o$) 切割, 两端镀 900~1030 nm、1100~1300 nm 信号光和闲频光波段增透 ($T>99.5\%$) 以及 560~630 nm 增透 ($T>95\%$) 膜系。KTP 晶体用铝箔包裹, 置于铝制水冷夹具中, 水温 20 °C, LBO 晶体用铝箔包裹置于铝制夹具后 TEC 加温至 30 °C 附近工作。

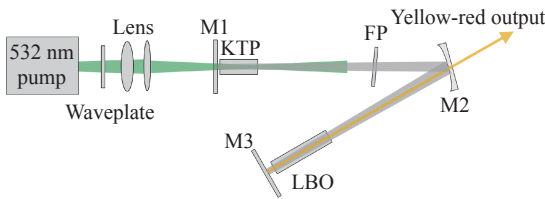


图 1 实验光路示意图

Fig.1 Experimental light path schematic

实验中 M1 镜距离 KTP 晶体 3 mm, KTP 晶体距离 M2 镜 38 mm, M2 镜距离 LBO 晶体 45 mm, LBO 晶体距离 M3 镜 5 mm。由于脉冲运转的 OPO 非线性增益较高, 得到的闲频光和信号光光谱较宽, 在 OPO 腔内插入标准具压缩振荡闲频光的光谱线宽。所用标准具为熔融石英基质, 厚度 500 μm , 未镀膜, 在 1200 nm 附近自由光谱范围 0.98 nm, 精细度 0.6。忽略非线性晶体中的热透镜, 利用传输矩阵得到腔内振荡 1180 nm 闲频光的基横模光斑半径分布, 如图 2 所示。折叠角半角 15° , 此时晶体中子午和弧矢面的像散并不明显, OPO 增益介质 KTP, 光斑尺寸在 141 mm×151 mm 到 145 mm×154 mm 之间, 与 532 nm 泵浦光实现良好的模式匹配以保证效率, 而 LBO 晶体中光斑在 126 mm×129 mm 到 140 mm×142 mm 之间。实验中所用功率计表头和探头分别为 Ophir NOVA II 和 50(150)A-BB-26。

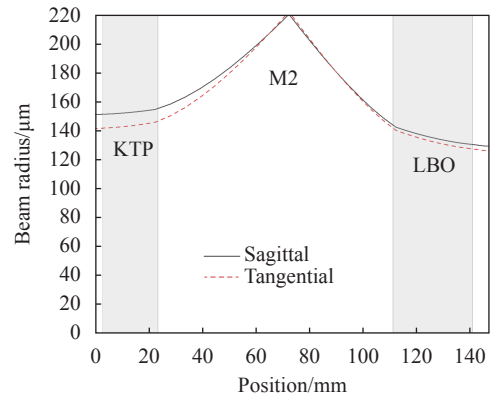


图 2 OPO 谐振腔内振荡闲频光的基横模光斑半径分布

Fig.2 Fundamental transverse mode beam radius of the oscillating idler wave in the OPO cavity

2 实验结果及讨论

首先在没有插入标准具的情况下测试 OPO 自由运转时的波长调谐特性, 入射 KTP 晶体的最大泵浦功率 24 W 下, 通过调节 KTP 晶体角度得到的黄光输出波长调谐范围为 587.2~595.2 nm, 其中最大平均功率 3.12 W 出现在黄光波长 591.2 nm 处, 而非晶体设计切割方向对应的 590 nm, 其原因可能在于内腔高功率作用下晶体温度的上升, 也可能在于谐振腔和晶体准直因素。图 3 给出 OPO 波长调谐曲线, 其间 KTP 晶体角度需在 $\pm 0.6^\circ$ 范围内调节, 对应 24 W 入射泵浦功率, 最高平均输出功率 3.12 W 的转换效率为 13.0%, 需要说明的是, 在信号光和闲频光波长调谐的同时, 为获得较高的倍频转换效率, LBO 晶体温度也需在 30.1~35.6 °C 间进行相应调节。

用光谱仪 Ocean Optics USB2000 记录输出黄光

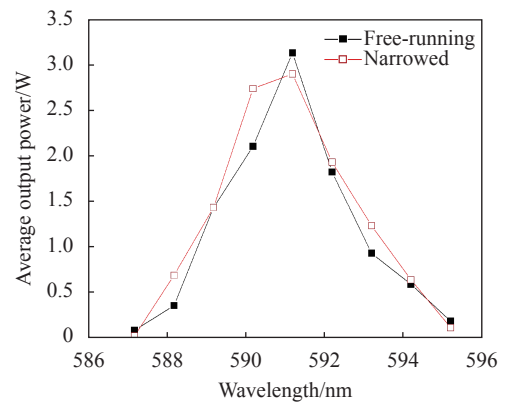


图 3 黄光输出波长调谐曲线

Fig.3 Yellow output wavelength tunable curves

光谱。由于脉冲泵浦下 OPO 过程的非线性增益很高,未加入标准具自由运转情况下最高输出功率 3.12 W 时黄光光谱半高全宽在 0.6~0.7 nm,如图 4 所示。加入标准具后,在输出波长 591.3 nm 时获得了最高输出功率 2.89 W,转换效率 12.0%,此时光谱线宽为 0.15 nm,几乎到达仪器分辨率,可见腔内标准具的使用有效改善了 OPO 的光谱特性,实验中所用标准具没有镀膜,精细度仅为 0.6,如使用精细度更高的标准具有望进一步压缩 OPO 的输出光谱。图 3 中同时也给出了加入标准具后 OPO 在最大泵浦功率下的调谐曲线,可以看出,标准具的引入并没有对激光器的功率效率以及波长调谐特性带来明显的负面影响。

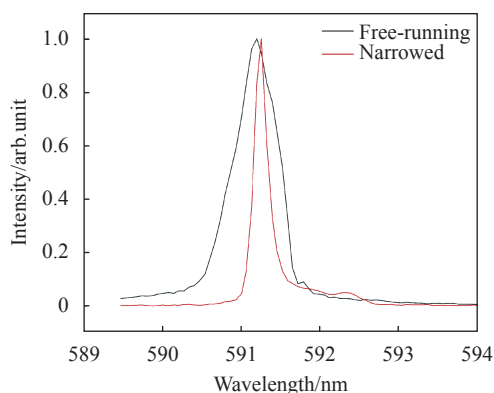


图 4 OPO 自由运转以及加入标准具后的输出光谱

Fig.4 Output spectra of the OPO with and without etalon

图 5 给出 OPO 固定输出波长 591.2 nm、腔内插入标准具时平均输出功率随泵浦功率变化的曲线。在重频 10 kHz 的绿光泵浦下,OPO 阈值为 7.2 W 泵浦功率;泵浦功率超过阈值后,OPO 的黄光输出功率和转换效率,随泵浦功率增加迅速上升,但转换效率在泵浦功率 18 W 时有极大值,为 13%,随后则出现缓慢下降,对应输出功率曲线的斜率发生下降,到最大泵浦功率 24 W 时 2.89 W 输出功率对应的转换效率为 12.0%,推测是由于 532 nm 泵浦光的光束质量在高功率下发生劣化以及非线性晶体中的热效应所致。利用硅探测器 Thorlabs DET10A 和示波器 Tektronix TDS2024C 测得平均输出功率 2.89 W 时,黄光脉冲宽度 37 ns,对应单脉冲能量和峰值功率分别为 0.29 mJ 和 7.8 kW。通过刀口法测得此时的水平方向上的光束质量因子 M^2 为 3.4。

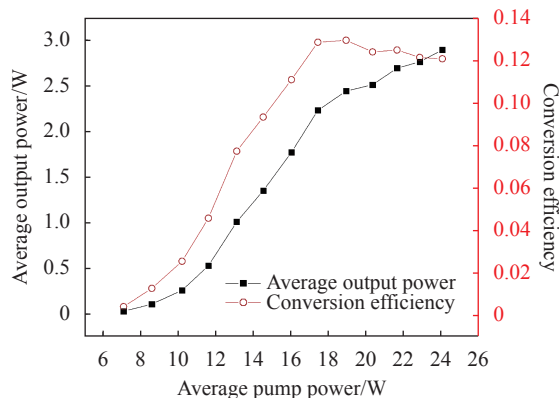


图 5 OPO 的输出功率和转换效率

Fig.5 Average output power and conversion efficiency of the OPO

3 结论

通过谐振腔优化设计实现 532 nm 脉冲绿光泵浦的折叠腔 KTP-OPO,采用 LBO 晶体对振荡的闲频光内腔倍频,得到波长调谐范围 587.2~595.2 nm 的黄光输出。在此基础上,在 OPO 谐振腔内插入标准具,将黄光线宽压缩至 0.15 nm,24 W 平均泵浦功率下,脉冲重复频率 10 kHz 的窄线宽黄光最高输出平均功率 2.89 W,峰值功率 7.8 kW,对应转换效率 12.0%,光束质量因子 $M^2=3.4$ 。证明了内腔倍频 KTP-OPO 是产生可调谐脉冲黄光的有效方法,而标准具的使用能够有效改善脉冲 OPO 的光谱特性。

参考文献:

- [1] My H, Drag C, Bretenaker F. Single-frequency and tunable operation of a continuous intracavity frequency doubled singly resonant optical parametric oscillator [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(13): 1455-1457.
- [2] Bäder U, Meyn J P, Bartschke J, et al. Nanosecond periodically poled lithium niobate optical parametric generator pumped at 532 nm by a single-frequency passively Q-switched Nd: YAG laser [J]. *Optics Letters*, 1999, 24(22): 1608-1610.
- [3] Philip Werner Metz, Fabian Reichert, Francesca Moglia, et al. High-power red, orange, and green Pr³⁺: LiYF₄ lasers [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(11): 3193-3196.
- [4] Elena Castellano-Hernández, Metz Philip W, Maxim Demesh, et al. Efficient directly emitting high-power Tb³⁺: LiLuF₄ laser operating at 587.5 nm in the yellow range [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(19): 4791-4794.
- [5] Bapna R C, Rao C S, Dasgupta K. Low-threshold operation of a

- 355-nm pumped nanosecond β -BaB₂O₄ optical parametric oscillator [J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, 40(6): 832-837.
- [6] Rao C S, Kundu S, Ray A K. High repetition rate nanosecond optical parametric oscillator pumped by the third harmonic of a DPSSL [J]. *Applied Physics B*, 2018, 124(8): 163.
- [7] Li H, Zhang H, Bao Z, et al. High-power nanosecond optical parametric oscillator based on a long LiB₃O₅ crystal [J]. *Optics Communications*, 2004, 232(1-6): 411-415.
- [8] Bi Y, Zhang H, Sun Z, et al. High-power blue light generation by external frequency doubling of an optical parametric oscillator [J]. *Chinese Physics Letters*, 2003, 20(11): 1957-1959.
- [9] Sun B, Ding X, Bai Y T, et al. High-power high-repetition-rate tunable yellow light generation by an intracavity-frequency - doubled singly resonant optical parametric oscillator [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(3): 1-10.