

引用格式:沈兆国,郝培育,翟仲军,等. 高功率高重频中红外激光器[J]. 电光与控制, 2018, 25(11): 116-119. SHEN Z G, HAO P Y, ZHAI Z J, et al. On high-power mid-IR laser with high repetition frequency[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(11): 116-119.

高功率高重频中红外激光器

沈兆国^{1,2}, 郝培育^{1,2}, 翟仲军³, 李程程³, 张晓杰^{1,2}, 张凤霞^{1,2}, 羊毅^{1,2}

(1. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000;

2. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000; 3. 山东华特知新材料有限公司, 济南 250101)

摘要: 为了获得高功率高重频中红外激光输出, 采用 LD 侧面泵浦技术和高重频调 Q 技术, 获得高功率高重频窄脉宽 1064 nm 激光输出。通过 1064 nm 泵浦 KTP 产生高峰值功率 2100 nm 激光输出, 并抽运 ZGP 晶体获得 12 mJ 的 4200 nm 中红外激光输出。通过 1064 nm 分别泵浦 PPLT 和 PPLN 获得 8.3 W 的 2100 nm 激光输出和 5.6 W 的 3900 nm 激光输出。试验结果表明: 通过高重频调 Q 技术和 LD 侧面泵浦技术, 可以实现高重频窄脉宽 1064 nm 激光输出, 泵浦非线性晶体可以获得高功率高重频中红外激光输出。

关键词: 中红外激光器; 高重频调 Q; 光参量振荡器; 双波段激光

中图分类号: TN249 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.11.023

On High-Power Mid-IR Laser with High Repetition Frequency

SHEN Zhao-guo^{1,2}, HAO Pei-yu^{1,2}, ZHAI Zhong-jun³, LI Cheng-cheng³, ZHANG Xiao-jie^{1,2},
ZHANG Feng-xia^{1,2}, YANG Yi^{1,2}

(1. Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang 471000, China; 2. Luoyang Institute of Electro-Optic Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China; 3. Shandong Huate New Material Limited Company, Ji'nan 250101, China)

Abstract: In order to obtain high-power mid-IR laser output with high repetition frequency, the LD side pumping technology and the high-repetition-frequency Q-switching technology are used to obtain 1064 nm laser output with high power, high repetition frequency and narrow pulse width. The 2100 nm laser output with high peak power is produced by the 1064 nm pumped KTP. The ZGP crystal is pumped to obtain the 4200 nm mid-IR laser output of 12 mJ. The 2100 nm laser output of 8.3 W and the 3900 nm laser output of 5.6 W are obtained by pumping PPLT and PPLN respectively through 1064 nm. The test results show that using the Q-switching technology with high repetition frequency and LD side pumping technology can achieve the 1064 nm laser output with high repetition frequency and narrow pulse width, and the high-power mid-IR laser output with high repetition frequency can be obtained by pumping the nonlinear crystal.

Key words: mid-infrared laser; Q-switching with high repetition frequency; optical parametric oscillator; dual-wavelength laser

0 引言

高功率高重频激光器在激光探测、中红外激光照明、激光对抗等领域有较高应用价值, 尤其在光电对抗领域, 高功率高重频中红外激光器是光电对抗系统的

重要部件, 其输出的性能及稳定性直接决定了应用效果。随着中波光电探测器的发展和应用, 其性能得到了业界肯定, 中波探测逐渐被用于光电探测系统, 目前在 1000 ~ 3000 nm 和 3000 ~ 5000 nm 波段探测器应用较为广泛, 为了实现对该波段的有效干扰, 需要研制在该波段之间的激光器^[1-6]。获得中波段输出的激光器主要有化学激光器、半导体激光器以及采用频率变换输出的激光器。化学激光器体积较大, 并伴随较多污染气体, 因此不宜采用; 半导体激光器, 尤其是量子级联激光器发展较迅速, 功率在逐渐提高, 但是国内单管

收稿日期: 2017-11-08

修回日期: 2017-12-26

基金项目: 国家自然科学基金(61575099)

作者简介: 沈兆国(1981—), 男, 山东临沂人, 硕士, 工程师, 研究方向为激光总体设计。

输出功率较低,集成后的体积较大,不利于现阶段工程化应用;采用频率变换输出的激光器主要利用 1000 nm 波段附近的激光器直接泵浦频率变换晶体产生,或者采用 2000 nm 波段附近的激光器泵浦频率变换晶体产生^[7-10]。为了获得高功率输出,本文采用了高峰值功率的 1064 nm 的激光器泵浦频率变换晶体 KTP 产生 2100 nm 激光,抽运 ZGP 晶体产生 4200 nm 的激光输出,利用光参量输出镜透过率设计实现了 2100 nm 和 4200 nm 激光双波段激光输出。采用了高平均功率的 1064 nm 的激光器泵浦频率变换晶体 PPLN 产生高功率 2100 nm 激光输出,泵浦 PPLT 产生了高功率 3900 nm 激光输出。

1 高峰值功率高重频中红外激光器研究

实验装置如图 1 所示。

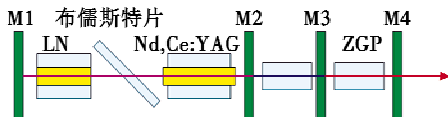


图 1 4200 nm 光参量振荡器实验装置图

Fig. 1 The 4200 nm OPO experiment setup

激光器采用了传统平平腔结构,有利于调节和高能量激光输出,M1(反射率 $R=85\%$,有利于降低腔内功率密度,避免对激光增益介质和非线性晶体的损伤)和 M2(S1 面: $T=80\%$ @ 1064 nm;S2 面: $R=99.8\%$ @ 2 μm , $T=80\%$ @ 1064 nm) 1064 nm 激光输出镜构成 1064 nm 激光谐振腔,腔长 $L=165$ mm。M2 和 M3 的 2100 nm 激光输出镜对 1064 nm 部分透过($T=15\%$,防止 OPO 调整时对器件的损伤)对 2 μm 部分反射($R=50\%$)。M3 和 M4(S1 面: $T=80\%$ @ 4200 nm;S2 面: $R=99.8\%$ @ 2100 nm, $R=80\%$ @ 1064 nm) 中红外激光输出镜构成第二级 OPO 光参量振荡器谐振腔,腔长 $L=10$ mm。激光增益介质为 Nd,Ce:YAG 螺纹棒,有利于降低激光振荡阈值和提高泵浦光吸收效率,Nd,Ce:YAG 螺纹棒直径为 $\phi 6$ mm,长度为 85 mm,两端面镀有对 1064 nm 高透的介质膜以减少激光振荡损耗。实验中采用脉冲 LD 作为泵浦源,脉冲 LD 阵列呈环形包在激光棒周围,通过循环水强制冷却。为了得到窄脉宽纳秒级脉冲,利用了侧面泵浦技术与电光调 Q 技术,采用高的电光系数及损伤阈值的 LN 作为电光调 Q 开关的晶体。其中,Q 开关控制电路产生约为 4000 ~ 5000 V 可调电压,加在 Q 开关上,脉冲 LD 电源产生的触发信号输入 Q 开关控制电路,经 Q 开关控制电路内部延时后,能有效控制电光 Q 开关。LN 晶体作为调 Q 开关主要有加压式、退压式、预偏置等几种方式。加压式一般需要四分之一波片,增加插入损耗;退

压式需要正负互补驱动电压,增加电路设计复杂难度;预偏置式不需要四分之一波片,也不需要互补电压,因此本文采用预偏置调 Q 方式。预偏置技术就是利用铌酸锂晶体的自然双折射效应,将初射入光提前偏离一定角度,使得 e 光和 o 光的光程差等于四分之一波长,等同于四分之一波片,利用折射率椭球可以计算出 e 光和 o 光的光程差。

$$\varphi = \frac{1}{2} n_0^3 l_z \sqrt{(n' \sin^2 \theta - 2\gamma_{22} E)^2 + 8\gamma_{22} E \sin^2 \theta \sin^2 \alpha} \quad (1)$$

$$n' = \frac{1}{n_e^2} - \frac{1}{n_o^2} \quad (2)$$

式中: l_z 为铌酸锂晶体长度; n_e 和 n_o 分别为 e 光和 o 光折射率; γ_{22} 为 LN 晶体的电光系数; α 为入射光主平面与晶体感应主轴 X' 和 Z' 组成平面的夹角。

当没有加电场情况($E=0$)时,光程差为

$$\varphi = \frac{1}{2} n_0^3 l_z n' \sin^2 \theta \quad (3)$$

初始光程差为 $\varphi_0 = \frac{\lambda}{4} + m\lambda$ 。在自然双折射入射

光偏振面与主平面成 $\pi/2$ 角度时偏振光往返经过晶体后,偏振光与初始偏振光正交,不能通过初始起偏器,激光谐振 Q 开关处于关门状态。入射光分解 e 光和 o 光的强度相等。将式(2)代入式(3)可得

$$\varphi_0 = \frac{1}{2} n_0^3 l_z \left(\frac{1}{n_e^2} - \frac{1}{n_o^2} \right) \sin^2 \theta = \frac{1}{4} \lambda + m\lambda \quad (4)$$

LN 晶体的 n_e 和 n_o 分别为 2.233 和 2.154,所以可以得到

$$\theta = \sqrt{\arcsin(3.19 + m \times 12.7) / l_z} \quad (5)$$

式中: $m=0,1,2,3,\dots$,选用 $m=0$,实际用的晶体长度为 20 mm,因此 $\theta \approx 0.36^\circ$ 。

OPO 频率变换采用 II 类相位匹配方式的 KTP 晶体,相位匹配角度为 51.5° ,另一角度为 90° ,晶体尺寸为 $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$,两个端面均镀有 2100 nm 和 1064 nm 增透膜;II 类相位匹配的 KTP 晶体作为非线性晶体放置在 Nd,Ce:YAG 激光器的谐振腔内,KTP 晶体在 150 ~ 2180 nm 波段有十分高的透射率,其有效非线性系数和抗损伤阈值也很大,适合作为产生 2100 nm 激光的晶体。实验中,OPO 工作在 KTP 晶体的简并点(信号光和闲置光频率相等),既可以获得高能量的 2100 nm 激光输出,又可以降低镀膜的难度。KTP 和 ZGP 晶体分别用铝箔包裹侧面后放入水冷铝块中进行冷却,水冷铝块通过循环水强制冷却,温度控制在 23°C 。

在电源输入电流 100 A、工作频率 50 Hz 的条件下,1064 nm 输出能量为 260.8 mJ。经过 KTP-OPO 频率变换技术实现 2100 nm 激光输出,采用内腔频率变换,在电源输入电流 100 A、工作频率 50 Hz 的条件下,

2100 nm 激光能量输出为 106.2 mJ, 1.06 μm 到 2 μm 转换效率达到 38.9%。在电源输入电流 80 A、工作频率 50 Hz 的条件下,采用内腔频率变换,获得 4200 nm 最高能量 12 mJ 激光输出,脉宽 8 ns,峰值功率高达 12.8 MW,2100 nm 到 4200 nm 转换效率达到 31.2%,剩余的 2100 nm 波段激光输出 45 mJ。4200 nm 激光器注入电流与输出激光能量关系如图 2 所示。

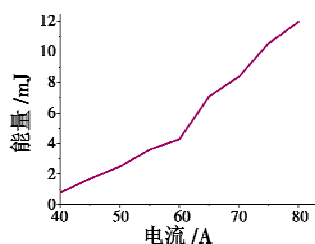


图 2 4200 nm 输出能量与注入电流关系

Fig. 2 The 4200 nm output energy vs input current

2 高平均功率高重频激光器研究

实验装置如图 3 所示。

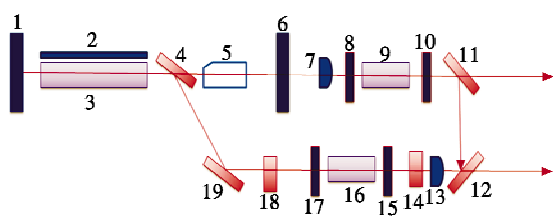


图 3 3900 nm 光参量振荡器实验装置图

Fig. 3 The 3900 nm OPO experiment setup

图 3 中,序号 1 为 1064 nm 激光器全反射镜,曲率为 1 m;2 为 808 nm 泵浦阵列;3 为激光增益介质 Nd:GdVO₄,在 810 nm 与 880 nm 附近具有两个吸收峰,吸收峰值是 808.5 nm,半宽是 Nd:YAG 的近二倍,较适合 LD 泵浦;4 为 1064 nm 偏振片;5 为声光调 Q,通过高重频驱动电源实现高重频控制及驱动;6 为输出镜,透过率为 20%;7 为 1064 nm 校正镜;8 为 2100 nm 全反射镜,镀膜为 2100 nm 全反,1064 nm 增透;9 为周期极化晶体 PPLT,用于产生 2100 nm 波段激光;10 为 2100 nm 输出镜,对 2100 nm 透过 40%,对 1064 nm 全透;11 为 1064 nm 折转镜,对 1064 nm 为 45°反射,对 2100 nm 波段 45°增透;12 为 3900 nm,45°折转镜,对 1064 nm 为 45°全反,对 3900 nm 为增透;13 为 1064 nm 聚焦镜,对 1064 nm 聚焦,对 3900 nm 增透;14 为四分之一波片;15 为 3900 nm 输出镜;16 为周期极化晶体 PPLT;17 为 3900 nm 全反射镜,对 1064 nm 增透,对 3900 nm 全反,对 1463 nm 波段全反;18 为 1064 nm 四分之一波片;19 为对 1064 nm 的 56.5°折转镜。激光器接收到工作指令后,激光电源对半导体阵列供电,产生在激光增益介质

吸收带内的光谱辐射,这些光被耦合到激光增益介质上,储存在激光增益介质激发态能级。为了提高激光脉冲峰值功率,Q 开关关闭,阻止在腔镜的反馈下产生的受激辐射,激光增益介质激发态能级储存的粒子数最大时,Q 开关打开,腔内迅速产生激光振荡,产生波长为 1.064 μm 的激光脉冲输出,经过差频晶体 PPLT,实现 2100 nm 激光输出;剩余的 1064 nm 激光进入 3900 nm 光参量振荡器,实现 3900 nm 激光输出,剩余的 1064 nm 激光进入原始的激光器内部,再次实现注入放大。当激光电源以一定频率工作时,激光器便产生一定频率的激光脉冲,这个过程中产生的热通过冷却系统耦合到外界。

利用 PPLT-OPO 频率变换技术,通过外腔频率变换方式,实现 3900 nm 和 2100 nm 双波段激光输出。在电源输入电流 40 A、调 Q 驱动频率 10 kHz 的条件下,获得 3900 nm 激光的最高输出功率为 5.6 W,2100 nm 激光的最高输出功率为 8.3 W。双波段输出功率与注入电流关系如图 4 所示。由图 4 可以看出,随着注入电流的增大,激光的输出功率线性增加。

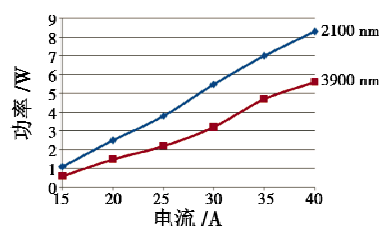


图 4 输出功率与注入电流关系

Fig. 4 The output power vs input current

3 结论

通过 1064 nm 泵浦 KTP 产生高峰值功率 2100 nm 激光输出,并抽运 ZGP 晶体,在电源输入电流 80 A、工作频率 50 Hz 的条件下,采用内腔频率变换,获得 4.2 μm 最高能量 12 mJ 的激光输出,2100 nm 波段激光输出 45 mJ。通过 1064 nm 分别泵浦 PPLT 和 PPLN 获得 2100 nm 激光输出和 3900 nm 激光输出,在电源输入电流 40 A、调 Q 驱动频率 10 kHz 的条件下,获得 3900 nm 激光的最高输出功率为 5.6 W,2100 nm 激光的最高输出功率为 8.3 W,均满足了某系统应用要求。

参考文献

- [1] 吕新杰,赵刚,李桂君,等.基于 PPLT 晶体的瓦级中红外光参量振荡器研究[J].中国科学,2009,39(11):1594-1598.
- [2] 彭跃峰,谢刚,王卫民,等.11.8 W 高效率掺氧化镁的周期极化铌酸锂晶体光参量振荡 2.7 μm 激光器[J].中国激光,2009,36(9):2262-2265.

- [3] 杨丁中,姜培培,陈滔,等. 基于周期性畴极化反转掺镁铌酸锂晶体的脉冲光纤激光器抽运的高功率光参量振荡器[J]. 中国激光,2010,37(1):34-37.
- [4] 杨剑,李晓芹,姚建铨,等. 基于周期极化铌酸锂晶体的高功率可调谐光参量振荡器[J]. 中国激光,2008,35(10):1459-1462.
- [5] 魏星斌,彭跃峰,王卫民,等. 基于周期极化钽酸锂晶体的光参量振荡器技术研究[J]. 光学学报,2011,31(6):145-149.
- [6] 雷仕湛. 激光技术手册[M]. 北京:科学出版社,1992:157-158.
- [7] 姚建铨,徐德刚. 全固态激光及非线性光学频率变换技术[M]. 北京:科学出版社,2007:48-70.
- [8] 崔前,徐一汀,宗楠,等. 高功率腔内双共振 2 μm 光参量振荡器特性研究[J]. 物理学报,2009,28(3):1715-1718.
- [9] 沈兆国,付洁,唐刚锋,等. 多光束泵浦中红外激光器[J]. 应用光学,2013,34(3):517-519.
- [10] 尚亚萍,李霄,王鹏,等. 10 W 级中红外光学参量振荡器偏振合成技术[J]. 光学学报,2016,36(10):195-201.
-
- (上接第 101 页)
- [J]. 中国航天,2015(7):40-42.
- [2] KIM T H, SIN C S, LEE S, et al. Analysis of effect of spoofing signal in GPS receiver[C]//International Conference on Control, Automation and Systems, IEEE, 2012:2083-2087.
- [3] 戴文博,肖明波,黄苏南. 无人机 GPS 欺骗干扰方法及诱导模型研究[J]. 通信技术,2017,50(3):496-501.
- [4] 王海洋,姚志成,范志良,等. 对 GPS 接收机的欺骗式干扰试验研究[J]. 火力与指挥控制,2016,41(7):184-187.
- [5] 闫占杰,吴德伟,何晶,等. GPS 转发欺骗式干扰源部署方法[J]. 现代雷达,2015,37(3):75-79.
- [6] 李雅宁,蔚保国,甘兴利. 卫星导航接收端反电子欺骗技术比较研究[J]. 无线电工程,2016,46(3):49-53.
- [7] 周轩,李广侠,蔡锭波,等. 卫星导航系统反欺骗技术的回顾与展望[J]. 导航定位学报,2013,1(3):79-84.
- [8] BRUGGEMANN T S, GREER D G, WALKER R A. GPS fault detection with IMU and aircraft dynamics[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2011, 47(1):305-316.
- [9] ZOU Q, HUANG S N, CONG M. Detection of GPS spoofing based on UAV model estimation[C]//Industrial Electronics Society, Conference of the IEEE, 2016:6097-6102.
- [10] 张华强,赵剡,连远峰. 基于自适应概率神经网络的 SINS/GPS 组合导航系统故障诊断方法[J]. 中国惯性技术学报,2012,20(6):749-753.
- [11] 陈碧,郭承军. GPS 欺骗干扰过程研究[J]. 科技通报,2016,32(10):164-169.
-
- (上接第 105 页)
- [5] WEI X, ZHANG S, CHAN S C. A novel visual object tracking algorithm using multiple spatial context models and Bayesian Kalman filter[C]//IEEE International Symposium on Circuits & Systems, 2015:1034-1037.
- [6] 吕柄蓬,蔡肖芋,董亮,等. 基于 TLD 框架的上下文目标跟踪算法[J]. 电视技术,2015,39(9):6-9,43.
- [7] CHEN S Y. Kalman filter for robot vision: a survey[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(11):4409-4420.
- [8] 王向华,覃征,杨新宇,等. 基于多次卡尔曼滤波的目标自适应跟踪算法与仿真分析[J]. 系统仿真学报,2008,20(23):6458-6460,6465.
- [9] 李帅. 基于稠密时空上下文的跟踪算法研究[D]. 重庆:重庆大学,2016.
-
- (上接第 115 页)
- Transactions on Control Systems, 1996, 17(4):71-76.
- [3] BO L. Nonlinear induced disturbance rejection in inertial stabilization systems[J]. SPIE, 1996, 2739(3):421-427.
- [4] 石红生,卢广山. 一种新型状态观测器在陀螺稳定平台中的应用[J]. 电光与控制,1999,6(1):24-28.
- [5] HAN J Q. Active disturbances rejection controller and its applications[J]. Control and Decision, 1998, 13(1):19-23.
- [6] 韩京清. 自抗扰控制技术 - 估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
- [7] GAO Z Q. Scaling and parameterization based controller tuning[C]//Proceedings of the American Control Conference, Denver:IEEE Press, 2003:4989-4996.
- [8] 高志强. 自抗扰控制思想探究[J]. 控制理论与应用, 2013,30(12):1498-1510.
- [9] 郑春艳,张红刚,冯兴伟,等. 机载光电稳定平台自抗扰控制研究[J]. 电光与控制,2017,24(2):51-54.
- [10] 高志强. 浅谈工程控制的信息问题[J]. 系统科学与数学,2016,36(7):908-923.
- [11] 朱斌. 自抗扰控制入门[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2017.