

高重频双波长复合干扰激光器设计*

叶庆¹, 范一松^{1,2}, 王磊¹, 卞进田¹

- (1. 国防科技大学 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037;
2. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所 安徽光子器件与材料省级实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要:为解决基频光高重频与倍频光高平均功率之间的矛盾,设计了一台干扰用高重频双波长复合输出激光器。静态仿真了泵浦源效率、激光晶体受热和受力分布、激光高斯模式特征,得到了该激光器的复合输出特性。动态仿真调Q频率、倍频晶体长度对复合输出的影响以及分析倍频晶体热效应,发现在泵浦功率和谐振腔结构不变的前提下,需先满足基频光高重频工作,再优化倍频晶体长度和控制倍频晶体温度可提高倍频光的输出功率。按上述仿真结论开展的验证实验结果表明:当磷酸氧钛钾晶体长度为12 mm、输出镜透过率为10%、重复频率为50 kHz时,设计的激光器基频光平均功率为18.98 W,倍频光平均功率为2.22 W,与仿真结论一致。

关键词:固体激光器;双波长复合输出;高重频;仿真与实验

中图分类号: TN242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2018)04-022-06

Design of dual-wavelength composite jamming laser with high-repetitive frequency

YE Qing¹, FAN Yisong^{1,2}, WANG Lei¹, BIAN Jintian¹

- (1. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China;
2. Anhui Provincial Laboratory of Photonic Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: In order to solve the contradiction between high repetition rate of fundamental wave and high average power of second-harmonic wave, a new 1064 nm/532 nm dual-wavelength composite jamming laser with high-repetitive frequency was designed. The composite output characteristics of the laser were obtained by the static analysis of the pump source's efficiency, heat and force distribution of crystal, and by the Gauss mode of laser. The influence on the dual-wavelength composite output was analyzed by changing the Q-switching frequency, the length of the second harmonic generation crystal and by simulating the thermal effect of second harmonic generation crystal. It is found that the high frequency of fundamental wave should be satisfied first, and the output power of second-harmonic wave can be improved by optimizing the length of the second harmonic generation crystal and by controlling the temperature of second harmonic generation crystal under the condition of the constant pumping power and the structure of the resonator. The simulation conclusion was verified by an experiment. The experimental results show that when the length of KTiOPO₄ crystal is chosen as 12 mm, the transmissivity of the output mirror is fixed to 10%, and the Q-switching frequency is selected as 50 kHz, the average output power of the fundamental wave is 18.98 W, and the average power of the output of second-harmonic wave is 2.22 W.

Key words: solid-state laser; dual-wavelength composite output; high-repetitive frequency; simulation and experiment

1064 nm 和 532 nm 的双波长全固态激光器在激光清洗、激光医疗、激光探测等领域具有重要的应用价值^[1-3]。不同的应用领域对激光器的性能指标要求不同,在激光对抗领域首先需要两路激光同时输出,从而减少干扰激光器的数量以提高设备的紧凑性^[4],其次需要532 nm 倍频激光平均功率尽可能大,以饱和干扰电视成像侦察与制导系统,1064 nm 基频激光频率应尽可能高,以对

抗基于波门识别原理的激光测距或半主动制导系统^[5-7]。

目前,国内外关于双波长激光技术的研究多集中在单波长可切换输出方面,追求同一时刻某一波长的激光高性能指标^[8-11]。例如,对于基频光(Fundamental Wave, FW)重复频率可以做到100 kHz以上,对于倍频光(Second-Harmonic Wave, SHW)平均输出功率可以做到百瓦以上,

* 收稿日期:2018-01-14

基金项目:脉冲功率激光技术国家重点实验室主任基金资助项目(SKL2015ZR01)

作者简介:叶庆(1981—),男,四川泸州人,助理研究员,博士,E-mail:yeqing0518@sina.com

光束质量可以做到接近衍射极限。然而国内外对于双波长激光同时输出的研究较少,目前很难做到各个波长激光的性能指标同时提高。例如,路磊等研制用于激光清洗的双波长激光器,基频和倍频光平均功率分别达到 30.4 W 和 9 W,但是重复频率只有 8 kHz^[1]。沈兆国等研制的水下探测用高重频双波段激光器,也获得了 1 kHz 重频 36 mJ 基频光输出和 20 mJ 倍频光输出^[12]。上述研究都追求双波长输出的高平均功率或者能量,虽然可满足倍频光进行饱和和干扰的需求,但重复频率都不够高,不能满足基频光进行高重频干扰的需求。本文通过仿真分析找出影响基频光重复频率与倍频光平均功率同时提高的因素,提出优化方案,并进行原理性实验验证。

1 仿真设计

1.1 激光器器件选择

一台激光器的设计包括谐振腔设计、增益介质与泵浦方式选择、调 Q 方式、倍频晶体和倍频方式选择等。

根据实验室条件,设计的双波长激光器拟采用平-平腔结构,腔长 $L = 346$ mm,后腔镜对基频光的反射率 $r_1 = 100%$,输出镜对基频光的反射率 $r_2 = 90%$,腔镜半径 $a = 1$ cm,谐振腔的菲涅尔数 $N = a^2 / (L\lambda) = 2.716$,由衍射造成的平行平面腔基模单程衍射因子 $\delta_d = 0.207N^{-1.4} = 0.05$,而腔镜反射不完全引起的基模单程损耗因子 $\delta_r = -0.51 \ln r_1 r_2 = 0.05$,忽略腔内材料吸收和几何偏折损耗,则谐振腔往返损耗为 0.20。

激光晶体选择 Nd:YAG, Nd^{3+} 掺杂浓度为 0.70 atm%,直径为 4 mm,长度为 66.70 mm,晶体泵浦热吸收率设为 26.6%,增益介质的上能级粒子寿命 $\tau = 230$ μs ,受激发射截面 $\sigma = 6.60 \times 10^{-19}$ cm^2 。

由于要求激光输出重频较高,可选声光调 Q。调 Q 晶体长度 40 mm,射频频率 27 MHz,关断功率 50 W,调制频率 1 ~ 50 kHz, Q 开关衍射效率 20%。

为提高倍频效率,采用腔内倍频。倍频晶体采用磷酸氧钛钾 (KTiOPO_4 , KTP), II 类相位匹配,匹配角 $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 23.27^\circ$,尺寸为 4 mm \times 4 mm \times 12 mm,有效非线性系数 $d_{\text{eff}} = 7.36 \times 10^{-12}$ m/V。

为提高设计效率,采用 ASLD 软件与自主 MATLAB 编程相结合的方法进行计算机数值仿真分析。

1.2 静态仿真

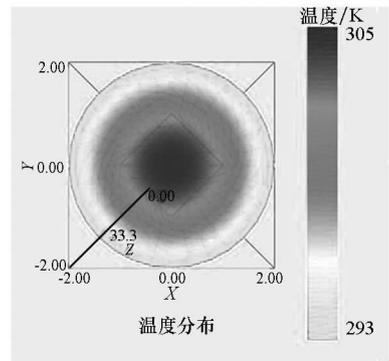
静态仿真是指固定激光器的输入参数,通过软件一次仿真得出激光器的输出结果。

1.2.1 泵浦源效率分析

根据半导体激光器发光特点及激光晶体吸收特性,需采用激光二极管 (Laser Diode, LD) 三面均匀泵浦。输入 154 W 泵浦光功率,利用 ASLD 软件的光线追踪方法仿真得到泵浦几何光学效率为 73.77%。

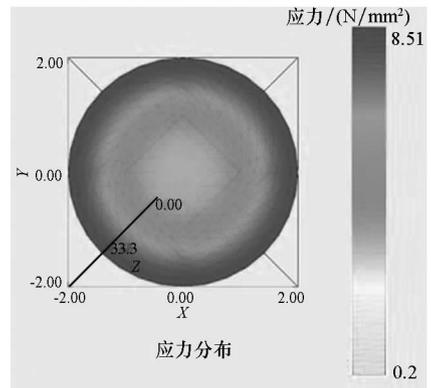
1.2.2 晶体受热和受力分析

ASLD 软件首先采用自适应网格技术将晶体进行空间离散化处理,得到 17 985 个计算网格,然后采用有限元技术对网格中的每个微元进行温度和形变应力分析,最后采用抛物线拟合得到激光晶体的折射率系数。通过仿真得到激光晶体的最大温度为 304.94 K,最大应力为 8.51 N/mm^2 ,温度分布、应力分布如图 1 所示。



(a) 激光晶体温度分布

(a) Temperature distribution of laser crystal



(b) 激光晶体应力分布

(b) Stress section distribution of laser crystal

图 1 激光晶体受热和受力仿真结果

Fig. 1 Simulation results of thermal and mechanical forces of laser crystals

1.2.3 高斯模式分析

ASLD 利用有限元法得到晶体的热应力和温

度分布后,可进行高斯模式分析。仿真得出晶体的热焦距在 x 和 y 方向都约为 372.34 mm,考虑热透镜效应以后谐振腔的 g_1 、 g_2 参数都属于稳定腔范围,基模高斯光束在棒中心以及镜片上的光斑大小分别为 0.37 mm 和 0.29 mm。

1.2.4 输出特性分析

在高斯模式分析的基础上,输出镜对基频光的透过率 $T = 10\%$,KTP 取 12 mm 时,建立内腔倍频调 Q 的基波速率方程,采用 MATLAB 编程,通过动态时间步进的 Runge-Kutta 法求解瞬态的速率方程,得到基频光与倍频光的腔内光子数密度如图 2 所示,激光器输出功率和脉宽参数如图 3 所示。

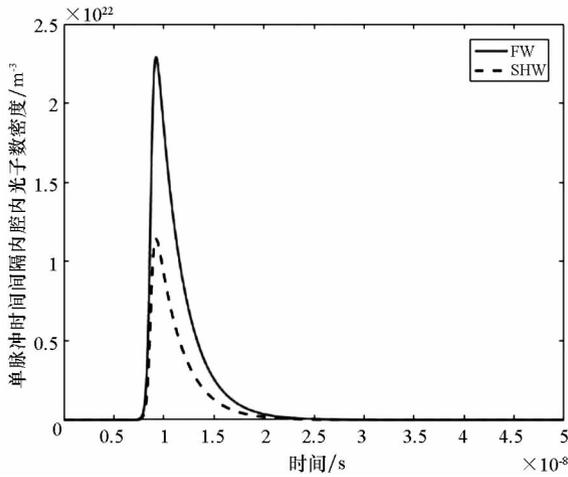


图 2 仿真的基频光与倍频光的腔内光子数密度
Fig. 2 Simulation intracavity photon number of FW and SHW

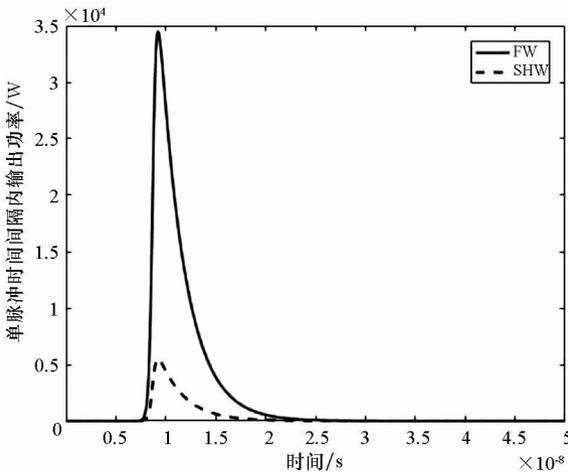


图 3 仿真的基频光与倍频光波形
Fig. 3 Simulation waveform of FW and SHW

从图 3 可以看出,此时基频光脉冲峰值功率 P_{max} 为 35 kW,脉宽 τ 为 10 ns,倍频光脉冲峰值功率 P_{max} 为 5 kW,脉宽 τ 为 7 ns,此时如果重频 f 为

50 kHz,根据 $P = P_{max} \times \tau \times f$,可得基频光平均功率为 17.50 W,倍频光平均功率为 1.75 W。

1.3 动态仿真

动态仿真是指改变激光器的某一系统参数进行多次仿真,对激光器的效率进行优化分析^[13]。

1.3.1 调 Q 频率对复合输出影响分析

按 5 kHz 的步长动态改变调 Q 重复频率,仿真得到一组数据,利用数据拟合,画出基频光与倍频光平均功率随调 Q 频率的变化关系如图 4 所示。仿真结果表明:改变调 Q 频率也可以改变输出基频光和倍频光的功率。对于基频光,调 Q 频率越高,输出平均功率越大;而对于倍频光,调 Q 频率越高,输出平均功率越小。

原因在于,调 Q 频率对激光器倍频功率的影响主要是影响初始反转粒子数的累积。在 5 kHz 附近,Q 开关每次打开间隔为 0.20 ms 左右,和 Nd:YAG 荧光寿命 0.23 ms 基本匹配,因此在连续泵浦光的作用下,此时打开 Q 开关,反转粒子数最多,使得腔内基频光光子数最多,倍频效率最高。增大调 Q 频率,使得 Q 开关打开间隔缩短,此时初始反转粒子数较 5 kHz 时减小,从而造成腔内基频光光子数较 5 kHz 时减小,倍频效率下降,但由于倍频光对于基频光来说是一种非线性损耗,与基频光强的平方成正比,所以虽然基频光小信号增益比 5 kHz 的时候减少,而损耗减少得更多,单脉冲能量较 5 kHz 时略有下降,而脉冲个数增大,从而造成基频光平均功率随着调 Q 频率的增大而增大。

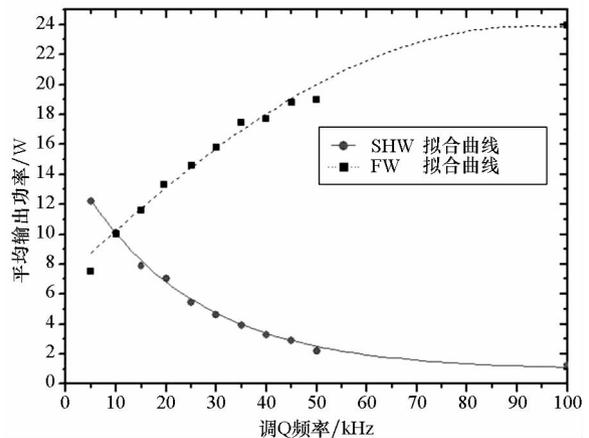


图 4 激光复合输出平均功率随 Q 开关频率的变化曲线

Fig. 4 Curve of the average power of laser combined output with Q switching frequency

1.3.2 倍频晶体长度对复合输出影响分析

按 1 mm 的步长动态改变 KTP 晶体的长度,

仿真得到一组数据,并利用多项式拟合,画出基频光与倍频光平均输出功率随倍频晶体长度的变化规律如图5所示。仿真结果表明:对于基频光,倍频晶体长度的增加会导致其平均输出功率持续下降;而对于倍频光,存在一个最佳倍频晶体长度,使其输出脉冲的峰值功率最大。

原因在于,在相位匹配的前提下,倍频晶体越长,基频光总向倍频光转移能量,基频光功率一直降低。但是倍频光功率由基频光的功率和倍频晶体长度共同决定,当倍频晶体长度刚开始增加时,基频光功率对倍频光功率的减小作用小于倍频晶体长度增加对倍频光功率的增大作用,所以倍频光输出功率逐步提高。当倍频晶体长度大于最佳长度以后,基频光功率对倍频光功率的减小作用大于倍频晶体长度增加对倍频光功率的增大作用,所以倍频光输出功率逐步减小。

仿真结果表明:采用4 mm的KTP晶体最佳,但是实际倍频过程中,脉冲光斑的分布不均匀,空间时间走离,晶体热效应都会降低倍频效率,所以应该选择稍大于4 mm的KTP晶体。又因为倍频晶体加工较为困难,成本高,很难在实验中动态改变其长度,故本实验采用已有的12 mm晶体。

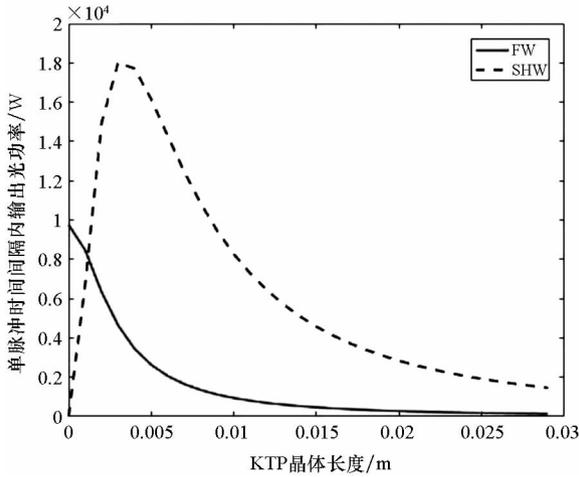


图5 基频光与倍频光平均输出功率随KTP长度变化的关系

Fig.5 Relationship between the average output power of FW and SHW with different lengths of KTP crystal

1.3.3 倍频晶体热效应分析

ASLD虽然功能强大,但不能进行倍频晶体的热分析,只能通过MATLAB求解非线性晶体热效应模型,得到KTP晶体内部的温度分布,如图6所示,并参考KTP晶体色散方程,得到最佳相位匹配角随温度的变化曲线,如图7所示^[14-15]。仿真结果表明:晶体沿轴向温度虽然逐渐降低,但变化不明显,晶体沿径向温度变化剧烈,近似高斯分

布。径向温升会增大倍频晶体的相位匹配角,导致倍频晶体相位失配,降低倍频效率,从而减少倍频光的输出功率。

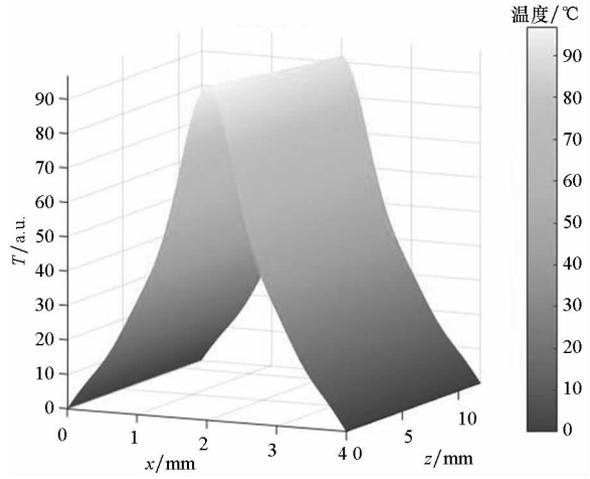


图6 KTP晶体内部温度分布

Fig.6 Temperature distribution of KTP crystal

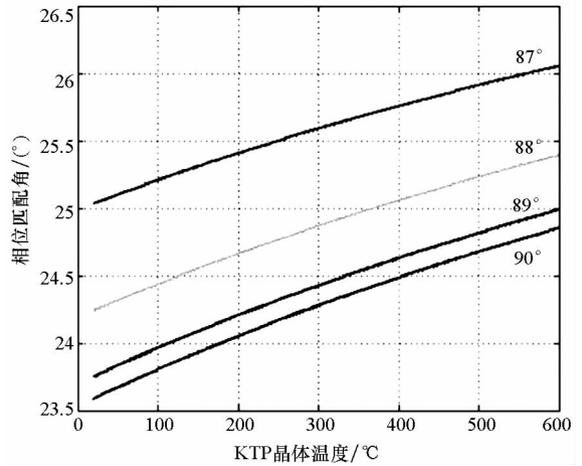


图7 KTP晶体相位匹配角随温度的变化

Fig.7 Relationship between phase matching angle of KTP crystal and temperature

2 实验验证

2.1 实验装置

按照上述思路设计好的激光器需实验测试其输出特性,测量装置如图8所示^[15]。其中:M0为激光谐振腔后腔镜,对双波长高反;M1为输出前腔镜,对倍频光高透,而对基频光的透过率为10%;M2为谐波镜,对基频光高透,倍频光高反;M3~M5为带通滤光片,都对基频光高透,倍频光高反。由于实验输出激光为复合光,必须先分光再测量,因此实验采用微倾双滤光片的方法分光,即M3、M5略微倾斜,通过两次小角度反射将谐波成分分离。

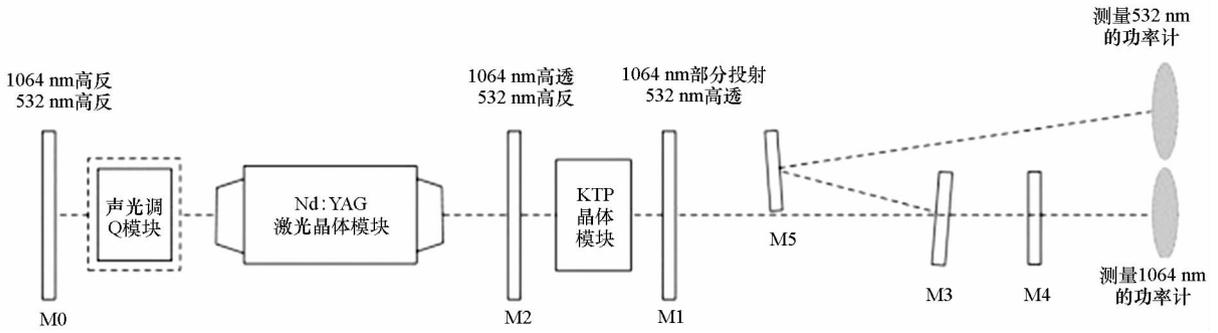


图 8 实验测量原理图

Fig. 8 Experimental schematic drawing

2.2 实验结果

按仿真结论,选择 12 mm 长的 KTP 晶体,将 KTP 晶体用铝箔包裹置入夹持冷却装置中进行温度控制,实验测量当调 Q 频率为 5 kHz、20 kHz 和 50 kHz 以及连续输出 (Continuous Wave, CW) 四种情况下基频与倍频光输出功率随输入电流的变化关系如图 9 所示。

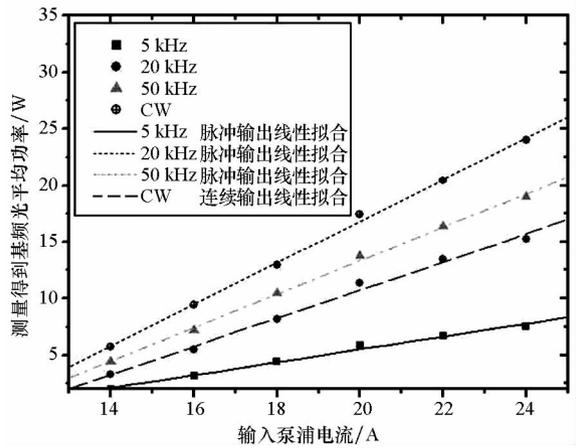
固定某一泵浦电流,可以看出,实验中基频光与倍频光输出功率大小随调 Q 频率的变化规律与仿真结果基本一致性。

固定调 Q 频率为 50 kHz,可以看出,当输入电流为 24 A,相当于泵浦功率为 154 W 时,实验测出的基频光的平均功率为 18.98 W,倍频光的平均功率为 2.22 W。而同等条件下,仿真得到的基频光的平均功率为 17.50 W,倍频光的平均功率为 1.75 W,两者具有较好的一致性。

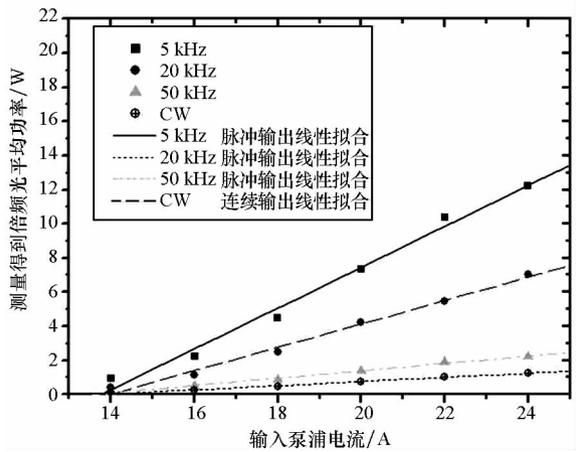
3 结论

静态仿真结果表明:利用 ASLD 仿真软件设计的激光器确实可以实现双波长复合输出,但是基模高斯光束半径在棒中心还比较小,激光基模体积较小,这说明谐振腔的各个参数还有进一步优化设计的空间。

动态仿真结果表明:平-平腔内倍频,基频光的高重频和倍频光的高平均功率输出是一对固有矛盾。由于双波长复合干扰输出首先要满足基频光的高重频,但高调 Q 频率的基频光会带来 Q 开关关闭时间的减小,从而不能和激光上能级的寿命匹配,造成初始累积的反转粒子数降低,影响基频光的峰值功率;而倍频效率又与基频光峰值功率的平方成正比,所以倍频光输出功率降低。在不改变腔体结构和泵浦方式的前提下,只能从倍频晶体长度、热效应等因素里去寻找提高倍频光峰值功率的办法。通过选择最佳 KTP 晶体长



(a) 基频输出平均功率随输入电流的变化曲线
(a) Curve of FW average output power with different input currents



(b) 倍频输出平均功率随输入电流的变化曲线
(b) Curve of SHW average output power with different input currents

图 9 不同调 Q 频率下基频与倍频输出功率随输入电流的变化曲线

Fig. 9 Curve of FW and SHW average output power with different input currents at variable Q-frequency

度,进行控温等措施来尽可能提高倍频效率。

实验结果表明:按照上述方法设计的双波长复合干扰激光器在 50 kHz 重复频率下工作,能够实现双波长输出,基频光的平均功率为 18.98 W,倍频光的平均功率为 2.22 W,与仿真结果的数量级一致。

当然,上述设计只是论证双波长高重复复合输出进行激光干扰的可行性,所得到的基频光重复频率和倍频光输出功率还不够高。基频光重复频率的提高可采用更高调制频率的调 Q 晶体来完成。对于倍频光输出功率的提高今后可通过优化谐振腔参数,优化 LD 泵浦方式,缩短激光脉冲的建立时间,以及双激光晶体棒串接的方式,并采用两个调 Q 晶体正交放置的方式提高其关断能力,增大基频光在倍频前的峰值功率。最后再重新仿真设计最佳长度的倍频晶体和对倍频晶体进行必要的热管理,以进一步提高倍频光的功率,从而真正满足实际干扰需求。

参考文献 (References)

- [1] 路磊. 全固态 1064 nm/532 nm 双波长激光清洗机关键技术的研究[D]. 长春:长春理工大学, 2012: 30-35.
LU Lei. Research on the key technology of all solid state 1064 nm/532 nm dual-wavelength laser cleaner [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012: 30-35. (in Chinese)
- [2] 张红波, 李正佳, 朱长虹. 长脉冲双波长 Nd: YAG 医用激光器的设计研究[J]. 激光杂志, 2003, 24(6): 68-69.
ZHANG Hongbo, LI Zhengjia, ZHU Changhong. The characteristic research for long-pulse double-wavelength Nd: YAG medical laser system[J]. Laser Journal, 2003, 24(6): 68-69. (in Chinese)
- [3] 延新杰, 李磊. 1064 nm/532 nm 双波长自由切换输出激光器[J]. 光电技术应用, 2015, 30(6): 37-39.
YAN Xinjie, LI Lei. 1064 nm and 532 nm dual-wavelength switchable solid state laser [J]. Electro-Optic Technology Application, 2015, 30(6): 37-39. (in Chinese)
- [4] 王磊, 赵明辉, 聂劲松, 等. 0.53 μm 和 1.06 μm 双波长复合激光干扰光电器件的实验研究[J]. 光电子: 激光, 2017(3): 256-262.
WANG Lei, ZHAO Minghui, NIE Jinsong, et al. Experimental study on 0.53 μm and 1.06 μm composite laser jamming military optoelectronic devices [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2017(3): 256-262. (in Chinese)
- [5] 周明, 赵元安, 李大伟, 等. 1064 nm 和 532 nm 激光共同辐照薄膜的损伤[J]. 中国激光, 2009, 36(11): 3050-3054.
ZHOU Ming, ZHAO Yuanan, LI Dawei, et al. Laser damage of optical film with the combined irradiation of 1064 nm and 532 nm pulse [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(11): 3050-3054. (in Chinese)
- [6] 吕跃广, 孙晓泉. 激光对抗原理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
LYU Yueguang, SUN Xiaoquan. Fundamentals and applications of laser countermeasures [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015. (in Chinese)
- [7] Li G, Li L, Shen H B, et al. Quantitative evaluation of high repetition rate laser jamming effect on the pulsed laser rangefinder [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(10): 2450-2453.
- [8] 程勇, 卢常勇, 刘旭, 等. 双波长自由切换输出固体激光器[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2299-2302.
CHENG Yong, LU Changyong, LIU Xu, et al. Dual-wavelength switchable solid state laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(9): 2299-2302. (in Chinese)
- [9] 耿爱丛, 徐登辉, 李熊, 等. 全固态绿光激光技术的评述与展望[J]. 激光与红外, 2011, 41(1): 3-7.
GENG Aicong, XU Denghui, LI Xiong, et al. Reviews and prospects of all solid state green laser technology [J]. Laser & Infrared, 2011, 41(1): 3-7. (in Chinese)
- [10] Ye P P, Zhu S Q, Li Z, et al. Passively Q-switched dual-wavelength green laser with an Yb: YAG/Cr⁴⁺; YAG/YAG composite crystal [J]. Optics Express, 2017, 25(5): 5179-5185.
- [11] Wang Y Y, Xu D G, Liu C M, et al. A high-power high-stability Q-switched green laser with intracavity frequency doubling using a diode-pumped composite ceramic Nd: YAG laser [J]. Chinese Physics B, 2012, 21(9): 0942121-0942126.
- [12] 沈兆国, 王建洲, 董涛, 等. 水下探测用高重复双波段激光器[J]. 应用光学, 2017, 38(4): 670-673.
SHEN Zhaoguo, WANG Jianzhou, DONG Tao, et al. High repetition rate dual-wavelength laser for under water detection [J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(4): 670-673. (in Chinese)
- [13] 王磊, 聂劲松, 王景楠, 等. 全固态激光双波长复合输出腔参数优化 [J]. 激光与红外, 2016, 46(11): 1353-1357.
WANG Lei, NIE Jinsong, WANG Jingnan, et al. Parameter optimization of all solid state laser dual wavelength composite output cavity [J]. Laser & Infrared, 2016, 46(11): 1353-1357. (in Chinese)
- [14] 王磊, 聂劲松, 叶庆, 等. 0.53 μm 全固态激光器热效应及其补偿技术研究[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(4): 0406003-1-0406003-7.
WANG Lei, NIE Jinsong, YE Qing, et al. Study on thermal effect and compensation technology of 0.53 μm all-solid-state laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(4): 0406003-1-0406003-7. (in Chinese)
- [15] Sabaecian M, Jalil-Abadi F S, Rezaee M M, et al. Temperature distribution in a Gaussian end-pumped nonlinear KTP crystal: the temperature dependence of thermal conductivity and radiation boundary condition [J]. Brazilian Journal of Physics, 2015, 45(1): 1-9.