

1.06 μm 、0.53 μm 全固态激光双波长复合输出技术研究

王磊, 聂劲松

(脉冲功率激光技术国家重点实验室(电子工程学院), 安徽 合肥 230037)

摘要: 针对现阶段光电对抗单波长激光干扰的局限性, 提出了干扰激光双波长复合输出方案, 为军用光电对抗设备的通用化和小型化提供了有效思路。利用稳态和速率方程理论分别建立了连续和脉冲激光复合输出模型, 通过数值仿真探究了倍频晶体长度和腔镜基频透射率对复合激光输出功率成分的影响。在连续输出状态下, 存在最佳基频透射率使基频输出功率最高; 对于两种输出状态, 都存在最佳倍频晶体长度使倍频输出功率最高。通过实验验证了连续和脉冲输出状态下复合激光输出功率成分随腔镜基频透过率的变化关系, 并进一步探究了重复频率对复合激光输出的影响。

关键词: 全固态激光; 激光干扰; 双波长复合输出; 谐振; 腔参数优化

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0305001

Study of all solid state laser dual-wavelength composite output technology operating at 1.06 μm and 0.53 μm

Wang Lei, Nie Jinsong

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology (Electronic Engineering Institute), Hefei 230037, China)

Abstract: For the limitation of single-wavelength laser interference in military electro-optical countermeasure, the composite output program of dual-wavelength laser was proposed, providing an efficient way for universalization of military electro-optical countermeasure equipment. With the theory of steady state and rate equation, the composite output model in both continuous and pulsed output conditions were established. The result of numerical simulation shows that there exists optimal KTP length in both continuous and pulsed conditions. While the best fundamental-wavelength(FW) transmissivity only exists in continuous condition. Through the experiment, the relationship between FW transmissivity and output ratio of composite laser was verified. The effect of repetition rate on output ratio is then explored in experiment.

Key words: all solid state laser; laser interference; dual-wavelength composite output; resonance; optimization of resonator parameters

收稿日期: 2016-07-05; 修订日期: 2016-08-15

作者简介: 王磊(1991-), 男, 硕士生, 主要从事固态激光技术方面的研究。Email: 1456618912@qq.com

导师简介: 聂劲松(1971-), 男, 教授, 博士, 主要从事激光技术及应用方面的研究。Email: njs7001@sina.com

0 引言

激光干扰^[1]是对抗战场光电侦查设备和光电制导设备的有效手段,现阶段激光对抗设备多为单波长输出,导致单设备对抗目标类型有限,而多波长复合干扰设备需要多台激光器,构造复杂,集成度低。1 064 nm 与 532 nm 激光分别为近红外和可见光波段光电对抗的常用激光,若一台激光器能同时产生这两种波长成分,就可以扩展干扰激光器的干扰波段,提高光电对抗设备的通用性。

目前,国内外关于全固态倍频绿光激光器的研究主要集中在单波长绿光高功率、高光束质量输出^[2-3]和双波长 1 064 nm 与 532 nm 分光路可切换输出^[4]方面。文中建立了双波长复合输出模型,通过对理论模型的分析与仿真,论证了双波长复合输出技术的可行性与有效性,利用实验验证了腔参数调节优化复合激光输出的一般性规律。

1 理论模型

1.1 连续激光双波长复合输出模型

传统全固态绿光激光器^[5-6]的谐振腔输出镜对 532 nm 激光高透,对 1 064 nm 激光高反。以连续输出固态激光为例,设输出镜对倍频光全透,对基频光存在一定透射率 T 。在内腔倍频的条件下,建立基频光稳态方程^[7]:

$$\frac{2g_0 l_c}{1+I_\omega/I_s} = \delta \quad (1)$$

式中: g_0 为基频光小信号增益; l_c 为增益介质长度; I_ω 为增益介质中的基波功率密度; I_s 为增益介质的饱和功率密度。

倍频过程消耗基频光,因此基频光损耗不仅包含吸收,衍射等线性损耗 δ_L ,还包含倍频导致非线性损耗 δ_{NL} 。

$$\delta_{NL} = K' I_\omega$$

K' 为非线性耦合系数^[8]:

$$K' = P K_0 = \frac{I_{2\omega}}{I_\omega} \quad (2)$$

$$K_0 = \frac{8\pi^2 d_{\text{eff}}^2}{\epsilon_0 n_\omega n_{2\omega} \lambda_\omega c} \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta k l}{2}\right) \quad (3)$$

式中: l 为倍频晶体的长度; d_{eff} 为 KTP 倍频晶体有效

非线性系数; n_ω 、 $n_{2\omega}$ 分别为 KTP 晶体中基频光与倍频光的折射率; λ_ω 为基频光波长; Δk 为相位失配量。

基频光线性损耗^[9]包含两部分。

$$\delta_L = \delta_r + \delta_0 \quad (4)$$

式中: δ_r 为输出镜对基频光的反射不完全损耗; δ_0 为包含往返吸收损耗和几何偏折损耗等在内的其他线性损耗。

对应的基频光与倍频光输出功率密度函数分别为

$$I_\omega' = I_\omega T \left[-\left(I_s + \frac{\delta_0 + \delta_r}{P K_0} \right) + \sqrt{\left(I_s - \frac{\delta_0 + \delta_r}{P K_0} \right)^2 + \frac{8g_0 l_c I_s}{P K_0}} \right]$$

$$I_{2\omega} = \frac{1}{4} \left[-\left(\sqrt{P K_0} I_s + \frac{\delta_0 + \delta_r}{\sqrt{P K_0}} \right) + \sqrt{\left(\sqrt{P K_0} I_s - \frac{\delta_0 + \delta_r}{\sqrt{P K_0}} \right)^2 + 8g_0 l_c I_s} \right]^2 \quad (5)$$

1.2 脉冲激光双波长复合输出模型

脉冲输出时,将倍频过程视为一种对腔内基频光的非线性损耗,以四能级系统为例,基波光子速率方程为^[9-10]:

$$\frac{dn_\omega}{dt} = P(N_0 - n_\omega) - B\phi n_\omega - A n_\omega$$

$$\frac{d\phi}{dt} = B\phi n_\omega - \alpha_L(t)\phi - A n_\omega - S_{NL} \quad (6)$$

式中: n 为反转粒子数密度; ϕ 为腔内基波光子数; P 为泵浦参数; B 为受激跃迁参数; A 为自发跃迁参数; $\alpha_L(t)$ 为 Q 开关及腔内其他线性损耗参数; S_{NL} 为倍频导致的非线性损耗参数。

线性损耗参数 $\alpha_L(t)$ 可表示为:

$$\alpha_L(t) = \alpha_0 + \alpha_Q \quad (7)$$

式中: α_0 为除 Q 开关以外的腔内其他线性损耗参数; α_Q 为 Q 开关的衍射损耗参数,可表示为:

$$\alpha_Q = \begin{cases} \alpha_1 & 0 < t < t_c \\ \alpha_1 \exp\{-[(t-t_c)/t_s]^2\} & t \geq t_c \end{cases} \quad (8)$$

式中: α_1 为 Q 开关损耗系数; t_c 为 Q 开关关闭时间; t_s 为 Q 开关的开关时间常数。根据损耗参数定义,当腔内其他损耗为 δ_0 ,声光调 Q 开关的衍射损耗为 δ_Q 时

$$\alpha_0 = -\frac{c}{L} \ln(1 - \delta_0)$$

$$\alpha_1 = -\frac{c}{L} \ln(1 - \delta_Q) \quad (9)$$

式中: L , c 分别为腔长及光速; L/c 为光子在腔内单程渡越时间。

倍频产生的非线性损耗^[8]存在关系:

$$I_{2\omega} = \frac{8\pi^2 P d_{\text{eff}}^2}{\varepsilon_0 n_{2\omega} n_{\omega}^2 c} I_{\omega}^2 \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta k l}{2}\right) \quad (10)$$

由此得到谐波光子数密度:

$$\phi_{2\omega} = \frac{4\pi^2 P d_{\text{eff}}^2 h\nu}{\varepsilon_0 n_{2\omega} n_{\omega}^2 c} \phi_{\omega}^2 \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta k l}{2}\right) \quad (11)$$

由于谐波反射镜作用,考虑返程倍频,近似等效倍频晶体长度增加一倍,由倍频导致的基波粒子非线性损耗系数为

$$S_{NL} = \frac{c\Delta\phi_{\omega}}{2L} = \frac{c \cdot 2\phi_{2\omega}(2l)}{2L} = \frac{16\pi^2 P d_{\text{eff}}^2 h\nu}{\varepsilon_0 n_{2\omega} n_{\omega}^2 L} \phi_{\omega}^2 \text{sinc}^2(\Delta k l) \quad (12)$$

设前腔镜的基频透过率为 T ,对倍频光全透,通过对速率方程的求解得到基频光与倍频光的输出功率:

$$\begin{aligned} P_{\omega} &= h\nu\phi_{\omega}T \\ P_{2\omega} &= 2h\nu\phi_{2\omega} \end{aligned} \quad (13)$$

2 仿真与分析

2.1 连续激光复合输出仿真

取 Nd:YAG 为激光晶体,其长度为 20 mm, KTP 为倍频晶体,其有效非线性系数 $d_{\text{eff}}=7.36 \times 10^{-12}$,腔内其它损耗 $\delta_0=0.1$ 。通过数值仿真,如图 1 所示,得到连续激光输出功率密度图。

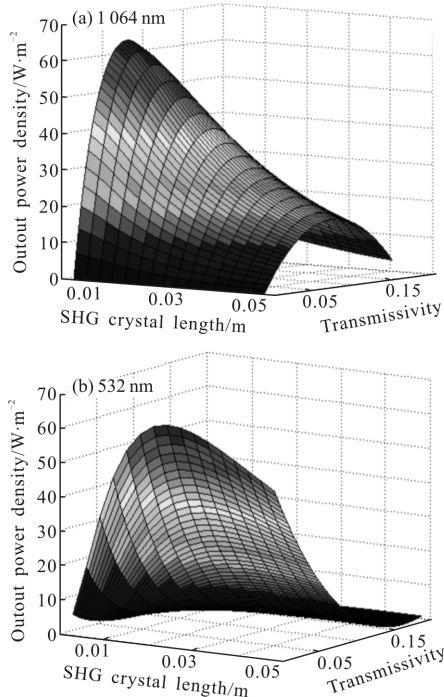


图 1 连续激光输出功率密度图

Fig.1 Output power density ratio of CW composite laser

在倍频晶体相位匹配的条件下,限定腔镜基频透过率 $T=2\%$,复合激光输出功率密度与倍频晶体长度的关系如图 2(a)所示。对于基频光,倍频晶体长度增加会导致其输出功率密度减小。对于倍频光,存在最佳倍频晶体长度使其输出功率密度最大。

限定倍频晶体长度 $l=3 \text{ mm}$,如图 2(b)所示,得到复合激光输出功率密度与腔镜基频透过率的变化曲线。对于基频光,存在最佳基频透过率使其输出功率密度最大。而对于倍频光,其输出功率密度会随着基频透过率的增大而减小,这时允许的最大基频透过率约为 14%。

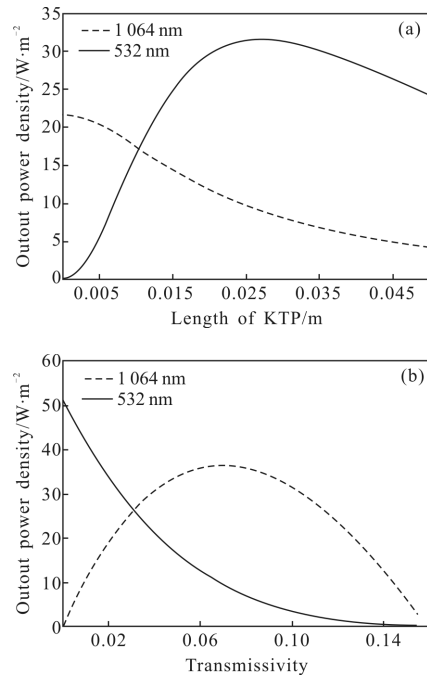


图 2 复合激光连续输出功率密度随 KTP 长度(a)和基频透过率 (b)的变化曲线

Fig.2 Output power densities of CW composite laser with different KTP lengths (a) and FW transmissivity (b)

2.2 脉冲激光复合输出仿真

取 Nd:YAG 晶体长度为 20 mm,吸收功率为 2 W, KTP 倍频晶体长度为 2 mm,腔长 $L=500 \text{ mm}$,腔镜基频透过率为 $T=10\%$,Q 开关衍射损耗 $\delta_Q=0.5$,腔内其它损耗 $\delta_0=1$ 。利用 Runge-Kutta 法对基波速率方程进行求解,如图 3 所示,得到 Q 开关打开时,基波与谐波的单脉冲输出波形。

仿真中,基频光峰值功率为 54 W,脉宽为 33.4 ns;倍频光峰值功率为 131 W,脉宽为 22.1 ns,比基频光

脉宽稍窄。

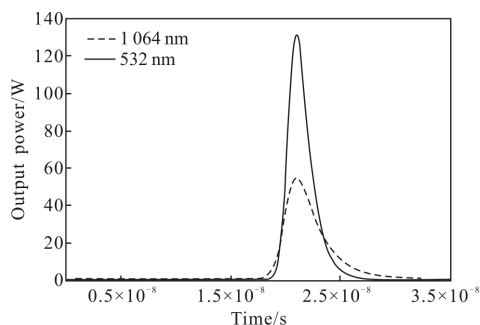


图 3 复合激光输出脉冲

Fig.3 Pulse of composite laser output

限定腔镜基频透过率为 10%，如图 4(a)得到脉

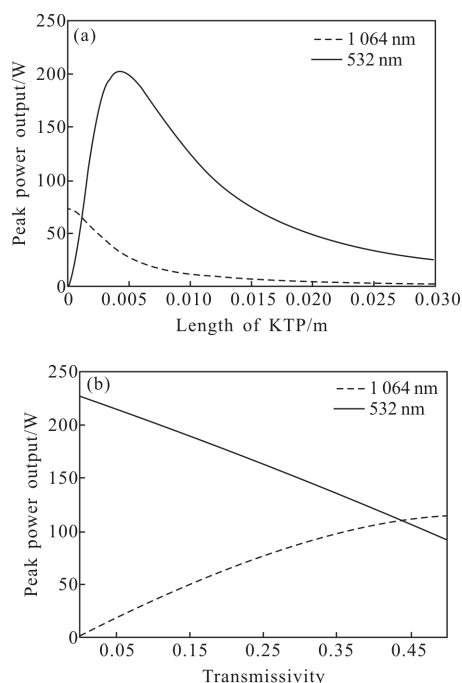


图 4 脉冲复合激光输出峰值功率随 KTP 长度(a)和基频透过率 (b)的变化曲线

Fig.4 Peak power output of composite laser with different KTP lengths (a) and FW transmissivity (b)

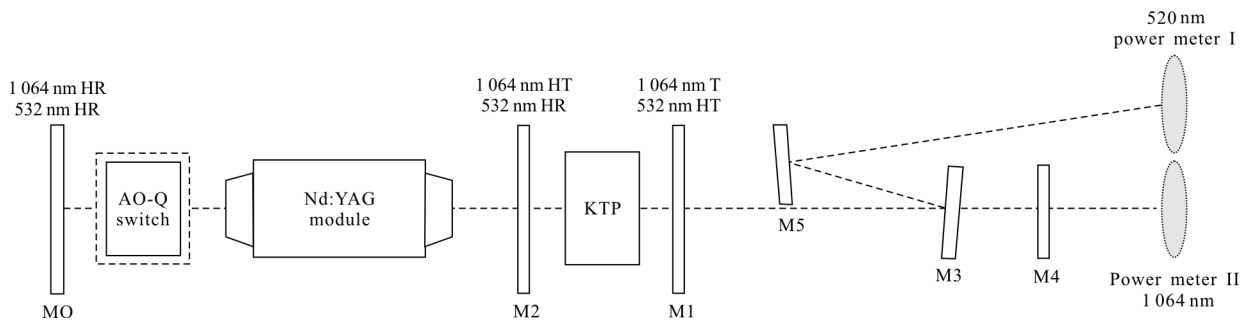


图 5 实验测量原理图

Fig.5 Experimental measurement schematic

冲复合激光输出峰值功率随 KTP 长度的变化关系。与连续输出情况类似,对于倍频光,同样存在最佳倍频晶体长度,使其输出脉冲峰值功率最大,但最佳长度较连续输出情况显著降低;对于基频光,倍频晶体长度的增加会导致其输出脉冲峰值功率的下降。

限定 KTP 倍频晶体长度为 12 mm,如图 4(b)得到脉冲复合激光输出峰值功率随腔镜基频透过率的变化关系。不同于连续输出情况,对于基频光,其输出脉冲峰值功率会一直随腔镜基频透过率的增大而增大,不存在最佳基频透过率。而倍频输出功率变化趋势则与连续输出时情况一致。

3 实验

3.1 实验装置

谐振腔采用平平腔结构,腔长为 340 mm;泵浦模块采用北京国科激光公司的 GKPMY-50A2 型半导体侧面泵浦模块,其 1064 nm 激光最大输出功率可达 70 W;调 Q 模块采用中科电集团的 QSGSY-5 型声光调 Q 开关;功率计采用 Coherent 公司的 FieldMaxII-TO(ROHS)型功率探测器。由于实验输出激光为复合光,测量不同波长激光存在困难,需先分光再进行测量,实验主要考虑的分光方法有棱镜色散分光法和带通滤光片分光法。经实验验证,棱镜色散分光法虽然能使光束分离但偏转角度不受控,且会导致光斑形状畸变,不利于后期对光束质量的测量;大角度入射下,单带通滤光片分光法对双波长激光分离不彻底,导致测量不准确。经过实验改进,论文采用微倾双滤光片分光法。

实验装置如图 5 所示,M1、M0 分别为前后腔镜,M2 为谐波镜,M3-M5 为带通滤光片,对 1064 nm 高透,532 nm 高反。其中 M3、M5 略微倾斜,通过两

次小角度反射将谐波成分分离,在较小的人射角度下,既保证了滤光片对谐波成分的高反射率,也降低了基波反射成分的影响;而 M3、M4 的两次滤光也很好地滤除了混杂在基波中的谐波成分。通过对滤光片倾角的微调以实现双波长分光夹角的调整,便于对双波长成分的在线检测。经实验测量,该探测装置对 532 nm 激光的总反射率为 95.86%,对 1 064 nm 激光的总透射率为 92.16%。

3.2 变基频透射率实验

实验准备了五种不同基频透射率的平面腔镜,其透过率分别为 2%、6%、10%、15% 和 20%,平均谐波透射率为 98.1%。在 14~24 A 的输入电流下,测得基频光和倍频光在不同基频透射率腔镜下的输出功率。如图 6 所示,对实验数据进行拟合。

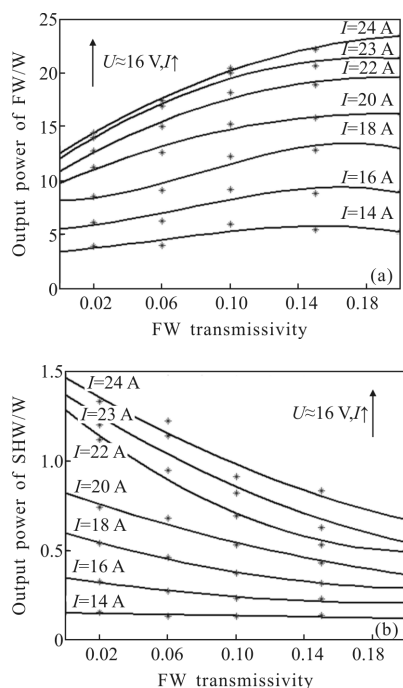


图 6 连续输出状态下基频(a)与倍频(b)输出功率随腔镜基频透射率的变化曲线

Fig.6 Output power of FW(a) and SHW(b) with different FW transmissivities in CW condition

与理论仿真对比,在连续输出情况下,基频与倍频输出功率随基频透射率的变化趋势基本一致。在输入电流小于 18 A 时,存在基频光最佳透射率约为 17%。

加入声光调 Q 模块,如图 7 所示,得到调 Q 频率为 5 kHz 时,在 14~24 A 输入电流下的基频和倍频

输出功率随腔镜基频透射率的变化关系曲线。

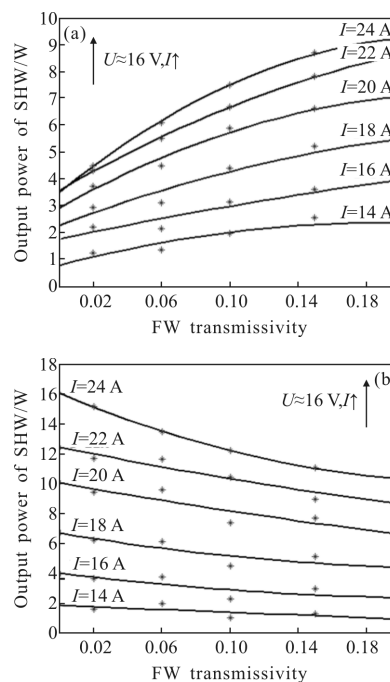


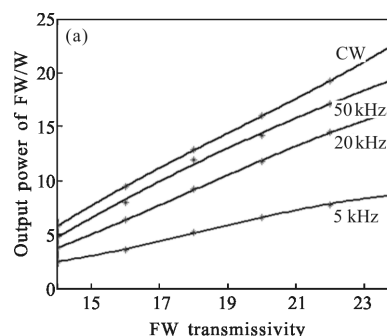
图 7 调 Q 频率 5 kHz 下基频(a)与倍频(b)输出功率随腔镜基频透射率的变化曲线

Fig.7 Output power of FW(a) and SHW(b) with different FW transmissivities at 5 kHz Q-frequency

在 5 kHz 脉冲输出状态下,基频与倍频输出功率随基频透射率的变化趋势与仿真基本一致,在腔镜基频透射率小于 20% 时,不存在基频输出功率极大值。相对连续输出状态,在脉冲输出状态下,倍频输出功率显著提高,实验中最大倍频输出功率可达 16 W。

3.3 变重复频率实验

为探究调 Q 频率对输出复合激光功率成分的影响,实验固定腔镜基频透射率为 15%,如图 8 所示,分别在无调 Q、5 kHz、20 kHz 和 50 kHz 四种状态下,得到了基频与倍频输出功率随输入电流的变化关系。



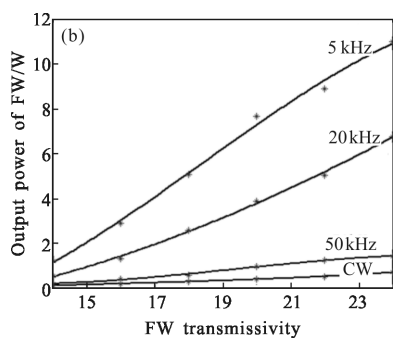


图 8 变调 Q 频率状态下基频(a)与倍频(b)输出功率随输入电流的变化曲线

Fig.8 Output power of FW(a) and SHW(b) with different input currents at variable Q-frequency

在输入电流一定时,调 Q 会导致基频光平均输出功率的下降,且重复频率越低,平均功率下降的越明显;相反,对于倍频光,调 Q 会导致其平均输出功率的大幅度提升,且重复频率越低,功率提升的越显著。

4 分析与讨论

4.1 倍频晶体长度

数值仿真表明,不论连续或脉冲输出,对于倍频光,都存在最佳倍频晶体长度使其输出功率最高。因为在相位匹配的前提下,倍频晶体长度小幅度的增加将有利于提高倍频效率,所以短期内倍频输出功率会有所提高。但过长的倍频晶体会大幅度削减腔内基频光功率密度,反而会抑制倍频效率的提升,进而抑制倍频输出功率。

对于基频光,倍频晶体长度的增加会削减腔内基频功率,进而导致基频输出功率的减小。倍频晶体加工较为困难,成本较高,所以可用于初期指导激光器设计。

4.2 腔镜基频透过率

理论和实验均表明,对于基频光,在连续输出时,存在最佳腔镜基频透过率使其输出功率最高,因为腔镜基频透过率的小幅度增加对腔内基频功率影响不大,短期内会导致基频输出功率的增加。当基频透过率继续增加,腔内基频功率明显降低,对基频输出功率产生抑制甚至削弱。在脉冲输出时,由于腔内瞬间基频功率很大,腔镜基频透过率的变化对腔内基频功率的影响很小,限制基频输出功率的主要是腔镜基频透过率,所以不存在最佳基频透过率。

对于倍频光,不论连续还是脉冲输出,腔镜基频透过率的增加都会导致腔内基频功率的减小,而过低基频功率密度又会对倍频效率产生限制,二者共同导致倍频输出功率的降低。腔镜成本较低,更换方便,所以可用于后期激光器的调校。

4.3 输出重频

实验表明,对于倍频光,调 Q 大幅度提高了腔内的基频功率密度,进而提高了倍频效率,导致倍频输出功率的大幅度提升。且重频越低,脉宽越窄,峰值功率越高,导致倍频效率越高,对倍频输出功率的提升就越显著。

对于基频光,根据能量守恒,调 Q 在大幅度提高了倍频输出功率的同时,也会大大降低基频输出功率,且重频越低,倍频输出功率的提升越显著,基频输出功率的下降幅度就越大。当重频很高,不论基频功率还是倍频功率都接近于连续输出。

5 结论

理论上,在连续和脉冲输出状态下,通过对倍频晶体长度和腔镜基频透射率的调节可以有效地调校输出复合激光的功率成分,倍频晶体长度的优选在初期指导激光器设计有着重要的意义。实验证明,腔镜基频透射率调节给后期激光器调校提供了可能,调 Q 会大幅度提升激光器的倍频效率,进而增加倍频激光占复合激光的比重,但重频过高对倍频输出功率提升不显著,重频过低又会抑制基频输出功率。因此应根据实际应用需求对倍频晶体长度、腔镜基频透射率和输出重频进行优化。

参考文献:

[1] Gao Donghua, Liu Songtao. Opto-electronic countermeasure technologies and their development [J]. *Optoelectronic Technology Application*, 2012, 27(3): 1-9. (in Chinese)
高东华, 刘松涛. 光电对抗技术及其发展 [J]. 光电技术应用, 2012, 27(3): 1-9.

[2] Gao Qingsong, Ma Yi, Pang Yu, et al. Research progress in all-solid-state high power green laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(9): 2373-2376. (in Chinese)
高清松, 马毅, 庞毓, 等. 高功率全固态绿光激光技术研究进展[J]. 强激光与粒子数, 2011, 23(9): 2373-2376.

[3] Zheng Haoxian, Guo Peng, He Qing. Advances in LD end-

- pumped intracavity frequency-doubling solid-state green lasers[J]. *China Science and Technology Information*, 2010, 4: 49–51. (in Chinese)
- 曾灏宪, 郭鹏, 贺庆. LD 端面泵浦内腔倍频全固态绿光激光器研究进展[J]. 中国科技信息, 2010, 4: 49–51.
- [4] 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)
- 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.
- [5] Zhang Huiyun, Zhang Yuping, Zhong Kai, et al. Efficient high power diode-side-pumped intracavity-doubled continuous wave green laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2003, 24(6): 68–69. (in Chinese)
- 张会云, 张玉萍, 钟凯, 等. 高效高功率侧面抽运腔内倍频连续绿光激光器[J]. 中国激光, 2003, 24(6): 68–69.
- [6] Wang Yuye, Xu Degang, Liu Changming, 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.
- [7] Koechner W. Solid-State Laser Engineering [M]//Rhodes W T. Springer Series in Optical Sciences, Vol.1. US: Springer, 2006: 618–620.
- [8] Chen Yunlin, Yuan Jianwei, Yan Weiguo, et al. Quasi-phase-matched second-harmonic-generation in bulk periodically poled LiNbO₃ and optimal design [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(5): 2079–2083. (in Chinese)
- 陈云琳, 袁建伟, 闫卫国, 等. 准相位匹配 PPLN 倍频理论研究及优化设计[J]. 物理学报, 2005, 54(5): 2079–2083.
- [9] Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Cheng Tangrong, et al. Laser Principle[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000. (in Chinese)
- 周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [10] Yao Jianquan. Nonlinear Optical Frequency Conversion and Laser Tuning Technology [M]. Beijing: Science Press, 1995. (in Chinese)
- 姚建铨. 非线性光学频率变换及激光调谐技术 [M]. 北京: 科学出版社, 1995.