

直接抽运 Cr,Nd:YAG/GTR-KTP 腔内倍频高效 稳定自调 Q 绿光激光器

林博鑫, 董俊

厦门大学电子工程系激光与应用光子学实验室, 福建 厦门 361005

摘要 采用 885 nm 激光二极管(LD)作为抽运源,Cr,Nd:YAG 双掺晶体和抗灰迹 KTP(GTR-KTP)分别作为工作物质和倍频晶体,在室温下实现了直接端面抽运 Cr,Nd:YAG/GTR-KTP 腔内倍频自调 Q 稳定脉冲绿光激光高效输出。当吸收抽运光功率为 1.65 W 时,获得了 200 mW 自调 Q 脉冲绿光激光输出,相应的光-光转换效率为 12.1%。当吸收抽运光功率大于 1.15 W 时,获得了脉冲能量大于 8 μ J、脉冲宽度为 8.8 ns、峰值功率超过 1 kW 的自调 Q 脉冲绿光激光输出。利用速率方程从理论上分析了不同 Nd³⁺ 离子掺杂浓度对 Cr,Nd:YAG/GTR-KTP 腔内倍频自调 Q 激光器输出倍频功率的影响,获得了实现高效绿光输出的优化掺杂浓度。相比于其他 885 nm LD 抽运腔内倍频产生绿光激光的方法,直接抽运 Cr,Nd:YAG/GTR-KTP 腔内倍频自调 Q 激光器可作为理想的激光源并有效压缩脉冲宽度,是一种实现高效、短脉冲小型化绿光激光器的新方法。

关键词 激光器; 自调 Q 激光器; 直接抽运; 腔内倍频; Cr,Nd:YAG

中图分类号 TN248 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.041403

Stable and Efficient Intracavity Frequency-Doubled Cr,Nd:YAG/GTR-KTP Self-Q-Switched Green Laser Under Direct Pumping

Lin Boxin, Dong Jun

Laboratory of Laser & Applied Photonics, Department of Electronic Engineering, Xiamen University,
Xiamen, Fujian 361005, China

Abstract Employing an 885 nm laser diode (LD) as the pumping source, the stable and highly efficient performance of a Cr,Nd:YAG/GTR-KTP intracavity frequency doubled self-Q-switched miniature green laser under end-pumping is demonstrated at room temperature by using the co-doped crystal Cr,Nd:YAG and gray tracking resistant KTP (GTR-KTP) crystal as laser active material and frequency doubling crystal respectively. The maximum average output power of 200 mW at 532 nm is achieved when the absorbed pump power is 1.65 W, and the corresponding optical-to-optical efficiency is 12.1%. When the absorbed pump power is greater than 1.15 W, the self-Q-switched green laser pulse is achieved with the energy over 8 μ J, the pulse width 8.8 ns and the peak power over 1 kW. Effects of different Nd³⁺ doping concentrations on the output frequency doubling power of a Cr,Nd:YAG/GTR-KTP intracavity frequency doubled self-Q-switched miniature green laser theoretically analyzed with the rate equations. The optimized Nd³⁺ doping concentration is obtained to achieve efficient green laser output. Compared with those methods generating green laser under 885 nm laser pumping, the directly pumped Cr,Nd:YAG/GTR-KTP intracavity frequency doubling self-Q-switched green laser is demonstrated to be a more ideal laser source for compressing pulse width effectively, and it provides a new method for developing highly efficient, short-pulse miniature green laser.

Key words lasers; self-Q-switched laser; direct pumping; intracavity frequency doubling; Cr,Nd:YAG

收稿日期: 2016-12-02; **收到修改稿日期:** 2016-12-15

基金项目: 国家自然科学基金(61275143,61475130)

作者简介: 林博鑫(1992—),男,硕士研究生,主要从事激光二极管抽运的被动调 Q 固体激光器方面的研究。

E-mail: boxinl@stu.xmu.edu.cn

导师简介: 董俊(1970—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事激光陶瓷材料制备及固体激光技术等方面的研究。

E-mail: jdong@xmu.edu.cn (通信联系人)

OCIS codes 140.3480; 140.3540; 140.3580; 140.3515; 140.3530

1 引言

高光束质量、高峰值功率、短脉宽特性的激光二极管(LD)抽运腔内倍频被动调Q绿光激光器在海底通信、激光显示、医疗应用和科学研究等领域具有非常广阔的应用前景。Cr,Nd:YAG晶体是通过在YAG基质中共掺Cr⁴⁺与Nd³⁺激光增益离子而获得的性能优良的自调Q激光晶体。近年来,LD抽运Cr,Nd:YAG自调Q激光器的研究取得了重要进展^[1-5]。腔内倍频技术可使激光在谐振腔内实现高效的倍频激光输出,LD抽运的腔内倍频绿光激光器结构也因此更加简洁紧凑^[6-7]。徐震等^[8]采用808 nm LD抽运Cr,Nd:YAG/KTP腔内倍频获得了平均输出功率为1 W的绿光激光脉冲,但脉冲峰值功率仅101 W。Du等^[9-10]基于Cr,Nd:YAG/KTP的自调Q锁模激光器也获得了532 nm绿光输出,光-光转换效率达到了10.6%,但输出自调Q脉冲激光的峰值功率小于200 W。最近,LD抽运的腔内倍频自调Q激光器获得了高效率、高峰值功率和短脉宽的绿光激光脉冲输出结果。当研究者在实验中采用808 nm LD抽运Cr,Nd:YAG/抗灰迹KTP(GTR-KTP)腔内倍频输出1.2 W绿光,进一步提高吸收抽运光功率时,热透镜效应导致峰值功率和脉冲能量下降^[11-12]。由此可见,LD在抽运固体激光器的过程中产生的热是限制高功率绿光激光输出的一个主要因素^[13]。采用885 nm LD作为抽运源,粒子直接从基态激发到激光上能级,可有效减少量子缺陷,使量子效率高达83%^[14]。因此,885 nm LD直接抽运产生的热负荷比采用808 nm LD抽运时产生的热负荷减小了30%。曹梦军等^[15]用885 nm LD抽运Cr,Nd:YAG/KTP腔内倍频获得了最大平均输出功率为92 mW的绿光激光输出,然而相应的光-光转换效率只有3%。采用885 nm LD作为抽运源,腔内倍频非线性晶体获得绿光激光输出的研究取得了系列进展,但这些实验均用V型腔倍频、主动冷却工作物质和倍频晶体获得连续波绿光输出,最大光-光转换效率只有10.1%^[16-18]。目前,还缺乏885 nm LD直接抽运Cr,Nd:YAG/GTR-KTP腔内倍频高效稳定自调Q绿光激光器方面的研究。

本文研究在室温下实现了直接抽运Cr,Nd:YAG/GTR-KTP腔内倍频自调Q稳定脉冲绿光激光高效输出。采用885 nm LD作为抽运源,研究了Cr,Nd:YAG/GTR-KTP腔内倍频绿光激光器的激光性能,获得了光-光效率高达12.1%、脉宽为8.8 ns、峰值功率超过1 kW的脉冲激光输出,而且绿光脉冲输出稳定。利用腔内倍频被动调Q激光器速率方程系统研究了Nd³⁺离子掺杂浓度对绿光激光器性能的影响,获得了可实现高效激光输出的优化的Nd³⁺离子掺杂浓度。

2 实验装置

885 nm LD端面直接抽运的Cr,Nd:YAG/GTR-KTP腔内倍频自调Q激光器的实验装置如图1所示。激光增益介质为一块<111>方向切割、尺寸为3 mm×3 mm×5 mm的Cr,Nd:YAG双掺晶体,晶体中的Nd³⁺和Cr⁴⁺离子的掺杂浓度分别为1%和0.01%(原子数分数,下同)。Cr,Nd:YAG激光晶体的2个端面加工抛光成平面,其中面对入射抽运光的一面镀885 nm的增透(AR)膜、1064 nm和532 nm的高反(HR)膜作为Cr,Nd:YAG/GTR-KTP自调Q激光器的后腔镜;另一面镀1064 nm和532 nm的增透膜以减少激光器的腔内损耗。腔内倍频晶体采用GTR-KTP II类临界相位匹配($\theta=90^\circ, \phi=23.5^\circ$),晶体尺寸为3 mm×3 mm×7 mm,其中面对Cr,Nd:YAG晶体的一面镀1064 nm和532 nm增透膜,另外一面镀1064 nm的高反膜和532 nm的增透膜作为激光器的前腔镜。885 nm LD直接抽运Cr,Nd:YAG/GTR-KTP腔内倍频自调Q绿光激光器的平平腔由Cr,Nd:YAG晶体和GTR-KTP晶体构成,谐振腔的长度范围通过GTR-KTP晶体与Cr,Nd:YAG晶体之间的间距调整为12~17 mm。用于激光实验的抽运源为光纤耦合连续输出的885 nm LD,光纤的芯径为400 μm、数值孔径为0.22。光纤输出的885 nm抽运光经过两个焦距为8 mm透镜组成的透镜组准直聚焦后,入射至Cr,Nd:YAG晶体表面。整个激光倍频实验在室温条件下进行,未加任何主动冷却装置。经过滤光片分光滤掉1064 nm的基频光后获得激光器倍频输出的532 nm绿光激光。脉冲激光的脉冲序列和脉冲波形采用频率为6 GHz,采样率为20 GS/s的数字示波器(TDS6604, Tektronix, 美国)分析和记录,光学光谱仪(EPP2000C-200 μm UV-VIS, StellarNet, 美国)测量激光发射光谱,以及光束质量分析仪(BC106-VIS, Thorlabs, 美国)测量分析绿光激光的输出模式。

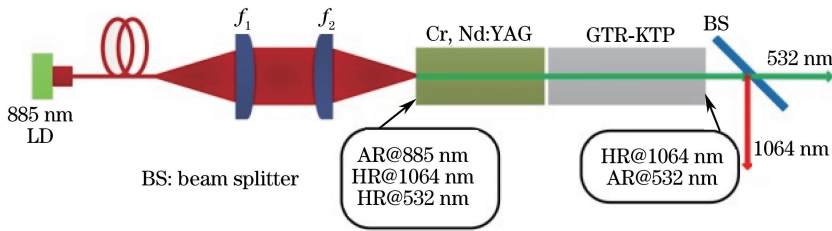


图1 激光器示意图

Fig. 1 Schematic of laser

3 结果与讨论

图2给出了885 nm LD抽运Cr,Nd:YAG/GTR-KTP腔内倍频自调Q绿光激光器的平均输出功率随吸收抽运光功率变化的曲线,插图为激光光斑图。在激光实验前,首先测试了Cr,Nd:YAG晶体对885 nm抽运光的吸收效率。结果表明,在没有激光输出的情况下,Cr,Nd:YAG晶体对885 nm抽运光的单程吸收效率约为43%,吸收效率较低主要是由于Cr,Nd:YAG自调Q激光器晶体在885 nm处的吸收系数较小。绿光激光输出的吸收抽运光阈值为0.68 W,当吸收抽运光功率高于激光阈值时,绿光平均输出功率随抽运光功率的增加而线性增加,激光斜效率为18.2%。在吸收抽运光功率为1.65 W时,获得了200 mW自调Q脉冲绿光激光输出,相应的光-光转换效率为12.1%,该光-光转换效率是在室温下885 nm LD作为抽运源腔内倍频产生绿光所知的最高转换效率。

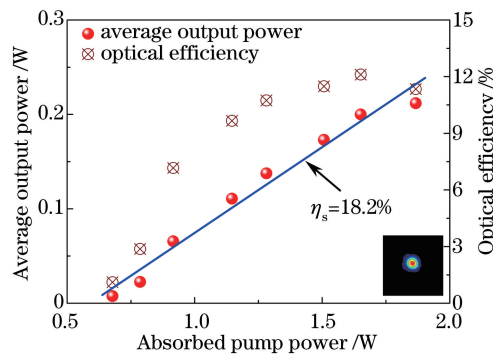


图2 平均输出功率随吸收抽运功率的变化曲线

Fig. 2 Average output power versus absorbed pump power

当Cr,Nd:YAG晶体与GTR-KTP晶体之间的间距约1 mm时,可优化入射到Cr,Nd:YAG晶体的抽运光斑位置使绿光激光器获得高效绿光激光输出,而且有利于入射到Cr,Nd:YAG晶体里抽运光束和激光光束的模式匹配,以此提高GTR-KTP晶体腔内倍频转化效率。图2中的插图给出了Cr,Nd:YAG/GTR-KTP腔内倍频自调Q绿光激光器在吸收抽运光功率为1.65 W时的激光模式空间分布,激光输出的模式为基横模TEM₀₀。由此可见,885 nm LD抽运Cr,Nd:YAG/GTR-KTP腔内倍频自调Q绿光激光器保持了高光束质量输出。

图3给出了885 nm LD直接抽运Cr,Nd:YAG/GTR-KTP腔内倍频自调Q绿光激光器输出激光脉冲特性(如重复频率、脉冲宽度、脉冲能量以及峰值功率)随吸收抽运光功率增加的变化曲线。脉冲重复频率随抽运光功率的增加呈线性增加,重复频率从3 kHz增加到22 kHz。当吸收抽运光功率小于1.28 W时,脉宽随吸收抽运光功率增加而减小;当吸收抽运光功率大于1.28 W时,脉宽随吸收抽运光功率增加而略有展宽,脉宽保持在大约10 ns。脉冲能量随吸收抽运光功率的增加而增加,在抽运光功率为1.65 W时获得最大脉冲能量为9.83 μJ。

图4给出了Cr,Nd:YAG/GTR-KTP腔内倍频自调Q绿光激光器在不同吸收抽运功率下的输出激光脉冲序列。在吸收抽运功率低于1 W时,获得了稳定的自调Q绿光激光脉冲序列[图4(a)、(b)]。随着吸收抽运功率的增大,激光脉冲序列振幅呈规律性变化。当吸收抽运功率大于1 W时,输出的激光脉冲序列呈

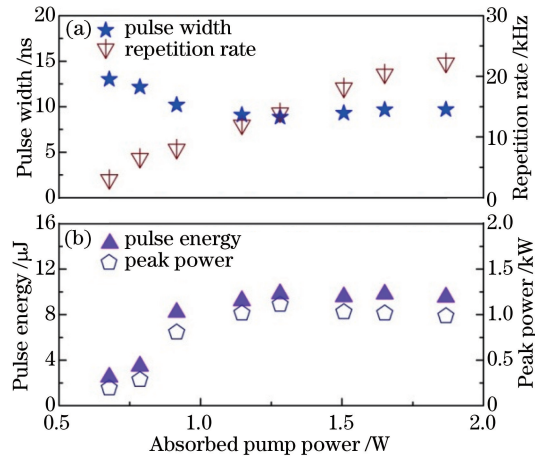


图 3 输出脉冲特性随吸收抽运功率的变化曲线。(a)重复频率和脉宽随吸收抽运功率的变化曲线；
(b)脉冲能量和峰值功率随吸收抽运功率的变化曲线

Fig. 3 Laser pulse characteristics versus absorbed pump power. (a) Pulse width and repetition rate versus absorbed pump power; (b) pulse energy and peak power versus absorbed pump power

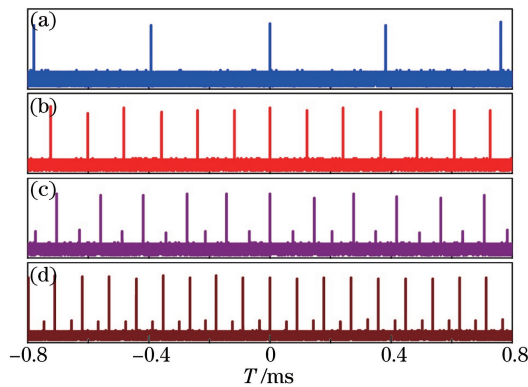


图 4 不同吸收抽运功率下的输出激光脉冲序列。(a) $P_{abs} = 0.68$ W; (b) $P_{abs} = 0.92$ W; (c) $P_{abs} = 1.28$ W; (d) $P_{abs} = 1.86$ W

Fig. 4 Output laser pulse sequences at different absorbed pump powers. (a) $P_{abs} = 0.68$ W;

(b) $P_{abs} = 0.92$ W; (c) $P_{abs} = 1.28$ W; (d) $P_{abs} = 1.86$ W

现幅度一高一低两个脉冲交替的周期性脉冲序列[图 4(c)、(d)]。输出的周期性脉冲序列主要由激光器腔较长而产生的两个纵模振荡造成。尽管在高功率抽运下激光脉冲序列呈现周期性变化,但是从整个脉冲序列来看,Cr,Nd:YAG/GTR-KTP 腔内倍频自调 Q 绿光激光器输出的脉冲序列是稳定的。周期性脉冲序列可以通过调节激光晶体或者 GTR-KTP 晶体的倾斜角度来改善。

图 5 给出了当吸收抽运光功率为 1.28 W 时 Cr,Nd:YAG/GTR-KTP 腔内倍频自调 Q 绿光激光器的绿光激光脉冲波形图。绿光激光的脉冲宽度为 8.8 ns,重复频率为 14 kHz,脉冲能量为 9.83 μ J,相应的峰值功率为 1.11 kW。图 5 的插图给出了在吸收抽运光功率为 1.28 W 时的绿光激光发射光谱,中心波长在 532 nm 附近。

当 Cr,Nd:YAG/GTR-KTP 腔内倍频自调 Q 绿光激光器的平均输出功率为 131 mW 时,测试了绿光激光器的稳定性。绿光平均输出功率随时间的变化如图 6 所示。885 nm LD 直接抽运 Cr,Nd:YAG/GTR-KTP 腔内倍频自调 Q 绿光激光器在室温下运行 2 h,其平均输出绿光功率抖动小于 2.1%。结果表明,未经主动冷却的 Cr,Nd:YAG/GTR-KTP 腔内倍频自调 Q 绿光激光器仍是一个稳定的激光光源。

尽管采用了 885 nm LD 作为抽运源直接抽运 Cr,Nd:YAG 晶体缓解了量子缺陷带来的严重的晶体热效应,但是 885 nm LD 直接抽运 Cr,Nd:YAG/GTR-KTP 腔内倍频自调 Q 绿光激光器的光学转换效率 (12.1%) 低于 808 nm LD 间接抽运 Cr,Nd:YAG/GTR-KTP 腔内倍频自调 Q 绿光激光器的光学转换效率 (17%)^[11-12]。造成直接抽运 Cr,Nd:YAG/GTR-KTP 腔内倍频自调 Q 绿光激光器光学转换效率不理想的

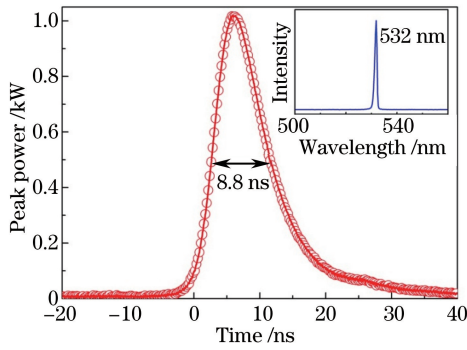


图 5 输出激光的脉冲波形

Fig. 5 Pulse profile of output laser

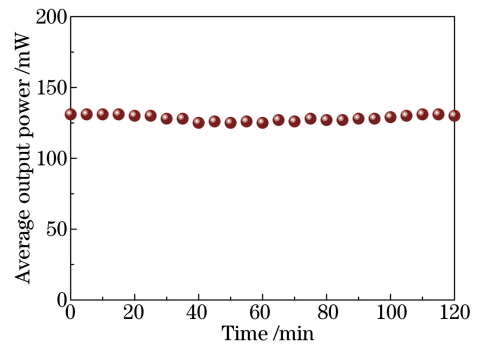


图 6 平均输出功率随时间的变化曲线

Fig. 6 Average output power versus time

原因主要是采用的Cr,Nd:YAG晶体中Nd³⁺离子的掺杂浓度仅为1%,Cr,Nd:YAG中Nd³⁺离子在885 nm处的吸收系数仅为808 nm处的1/3,因此,在同等条件下Nd³⁺离子在885 nm处对抽运光的吸收效率不及808 nm处的吸收效率。理论上,Cr,Nd:YAG晶体对885 nm抽运光低的吸收效率可以通过提高增益介质中Nd³⁺离子的掺杂浓度或者通过增加激光工作物质的长度来弥补,但在实际中Nd³⁺离子在YAG晶体中小的分凝系数导致生长的Nd:YAG晶体中的Nd³⁺离子的掺杂浓度一般不超过1.1%,因此,采用高掺杂浓度的Cr,Nd:YAG晶体作为增益介质不适合885 nm LD直接抽运Cr,Nd:YAG以提高对抽运光的吸收。此外,增加Cr,Nd:YAG晶体的长度不适合端面抽运小型化激光器的研制。透明激光陶瓷烧结技术为研制高浓度掺杂的Cr,Nd:YAG自调激光器陶瓷以用于Cr中,Nd:YAG/GTR-KTP腔内倍频自调Q小型化绿光激光器提供了可能,因为Nd³⁺离子在Nd:YAG透明激光陶瓷的掺杂浓度可以高达10%^[19-20]。高掺杂浓度的Nd:YAG陶瓷作为激光增益介质获得了高光学转换效率和高功率的激光输出,逐渐成为了一种新型的固体激光材料^[21-22]。然而有研究表明Nd:YAG透明激光陶瓷中Nd³⁺离子的掺杂浓度会严重影响其荧光寿命、吸收系数等^[23-24],特别是Nd:YAG透明激光陶瓷的荧光寿命随Nd³⁺离子掺杂浓度的增加而大幅降低,严重影响激光器的性能。Nd:YAG透明激光陶瓷的荧光寿命 τ 随Nd³⁺离子掺杂浓度的变化可以表示为^[19]

$$\tau = \frac{\tau_0}{1 + (C_{Nd}/C_0)^2}, \quad (1)$$

式中 C_{Nd} 是Nd³⁺离子的掺杂浓度, τ_0 是 $C_{Nd}=0$ 时的荧光寿命, C_0 是荧光淬灭参数。其中 $\tau_0=250 \mu\text{s}$, $C_0=2.8\%$ 。查阅文献获得了不同Nd³⁺离子掺杂浓度Nd:YAG激光增益介质的荧光寿命数据^[25],结合(1)式可以得到不同Nd³⁺离子掺杂浓度的Nd:YAG激光材料对荧光寿命的影响曲线。

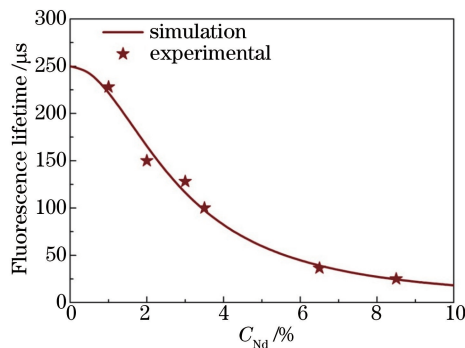
图 7 Nd:YAG 激光材料的荧光寿命随 Nd³⁺ 掺杂浓度的变化曲线Fig. 7 Fluorescence lifetime of Nd:YAG laser material versus Nd³⁺ doping concentration

图 7 给出了Nd:YAG激光材料荧光寿命随Nd³⁺离子掺杂浓度的变化曲线。从图 7 可以看出,当Nd³⁺离子掺杂浓度从1%增加到4%时,荧光寿命从230 μs 急剧降到70 μs ,随着Nd³⁺离子掺杂浓度的进一步增加,Nd:YAG的荧光寿命进一步缩短,但缩短的速度变缓。Nd:YAG的荧光寿命随Nd³⁺离子掺杂浓度的增加而缩短,主要是由于随着Nd³⁺离子掺杂浓度的增加,Nd³⁺离子间相互作用加强所造成的。根据

Danielmeyer 等^[26]的理论, Nd^{3+} 离子间极易形成交叉弛豫作用, 消耗激活离子, 这时的荧光寿命与 Nd^{3+} 离子掺杂浓度的平方成反比。

对于自调 Q 激光器来说, Cr, Nd:YAG 激光材料同时起到增益和可饱和吸收的作用, 因此增益介质和可饱和吸收体的长度是相等的, 在谐振腔内的位置也是相同的。自调 Q 激光系统实质上仍是被动调 Q 系统, 因此符合常规的被动调 Q 速率方程模型^[27]:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{dt} = \frac{\varphi}{t_r} [2\sigma n l - 2\sigma_{13} n_{s1} l_s - 2\sigma_{24} (n_{s0} - n_{s1}) l_s - \ln(1/R) - L] \\ \frac{dn}{dt} = W_p - \frac{n}{\tau_g} - \gamma\sigma c n \varphi \\ \frac{dn_{s1}}{dt} = \frac{n_{s0} - n_{s1}}{\tau_s} - \sigma_{13} c n_{s1} \varphi \end{cases}, \quad (2)$$

式中 φ 是腔内光子数密度, n 为增益介质中的反转粒子数密度, n_{s0} 、 n_{s1} 分别为饱和吸收体中总粒子数密度和基态的粒子数密度, l 、 l_s 分别为激光介质和饱和吸收体的长度, σ 为增益介质的受激发射截面, σ_{13} 、 σ_{24} 分别为饱和吸收体的基态和激发态吸收截面, τ_g 为增益介质的受激辐射寿命, τ_s 为饱和吸收体的恢复时间, R 为输出耦合镜的反射率, Y 为反转减少因子(对于四能级系统其值为 1), L 为腔内损耗, W_p 为抽运速率, $t_r = 2l'/c$ 为光子在谐振腔内的往返时间, l' 为光学腔长, c 为光速。

在腔内倍频自调 Q 系统中, 可以把倍频过程视为一种随基波光子数变化而变化的非线性腔内损耗。由二次倍频理论可知^[28], 二次谐波在腔内的往返功率为

$$P_{2\omega} = \frac{1}{2} \eta' A (chv\varphi)^2, \quad (3)$$

式中定义二次倍频参数 $\eta' = l_k^2 K_N \frac{\sin^2(\Delta k l_k / 2)}{(\Delta k l_k / 2)^2}$, l_k 为非线性晶体长度, A 为基频光的横截面积, Δk 为相位失配因子, K_N 是二次倍频因子。

假设增益晶体与倍频晶体的相位匹配, 二次谐波产生的输出功率 $P_{2\omega}$ 取决于腔内增益介质的发光强度 I_ω 。二次谐波产生的输出功率为^[24]

$$P_{2\omega} = I_\omega^2 \frac{d_{\text{eff}}^2 l_k^2}{n_1^2 n_2}, \quad (4)$$

式中 d_{eff} 为有效非线性转化系数, n_1 、 n_2 分别为基波以及二次谐波的折射率。

腔内增益介质的发光强度 I_ω 与抽运功率的关系为

$$I_\omega = \eta_s \cdot (P_{\text{pump}} - P_{\text{th}}), \quad (5)$$

式中 P_{pump} 为抽运功率, 斜效率 $\eta_s = 2K/(GA)$, 激光发射阈值 $P_{\text{th}} = GAI_s/(2K)$, G 为腔内总损耗, K 为归一化效率。饱和强度 $I_s = \hbar\omega/\sigma_{\text{eff}}\tau_{\text{eff}}$, σ_{eff} 、 τ_{eff} 分别为有效发射横截面面积和有效荧光寿命。根据腔内倍频被动调 Q 速率方程, 利用图 7 拟合得到不同 Nd^{3+} 离子掺杂浓度晶体的荧光寿命数据和实验过程使用的增益晶体、倍频晶体参数, 其各项参数如下: $\sigma_{\text{eff}} = 2.35 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, $\tau_{\text{eff}} = 230 \text{ }\mu\text{s}$, $\hbar\omega = 1.86 \times 10^{-19} \text{ J}$, $d_{\text{eff}} = 3.36 \text{ pm/V}$, $n_1 = 1.83$, $n_2 = 1.746$, 并取 $G = 0.03$, $A = 2.54 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$, 模拟计算出 885 nm LD 腔内倍频 Nd^{3+} 离子掺杂浓度为 1% 时增益介质的倍频输出功率与吸收抽运功率曲线, 如图 8 所示。

图 8 给出了理论计算的 885 nm LD 抽运 Nd^{3+} 离子掺杂浓度为 1% 时增益介质的输出倍频功率随吸收抽运功率的变化曲线, 虚线为模拟获得的输出倍频功率随吸收抽运功率的变化曲线, 模拟结果与实验测得的输出倍频功率变化趋势相近。当吸收抽运功率为 1.65 W 时, 885 nm LD 腔内倍频 Nd^{3+} 离子掺杂浓度为 1% 时增益介质的理论计算获得的光-光转换效率为 12.6%, 而此时实验测得的光-光转换效率为 12.1%, 二者相吻合。

通过改变增益介质中 Nd^{3+} 离子掺杂浓度, 进一步研究了输出倍频功率与 Nd^{3+} 离子掺杂浓度的关系。图 9 给出 885 nm LD 抽运不同 Nd^{3+} 离子掺杂浓度增益介质输出倍频功率变化曲线, 从图中可知, 随着抽运功率增加, 不同 Nd^{3+} 离子掺杂浓度的输出倍频功率均呈现增加趋势, 但是它们的变化趋势存在较大差异。当 Nd^{3+} 离子掺杂浓度低于 3%, 885 nm LD 腔内倍频增益介质输出功率随着 Nd^{3+} 离子掺杂浓度增加而增

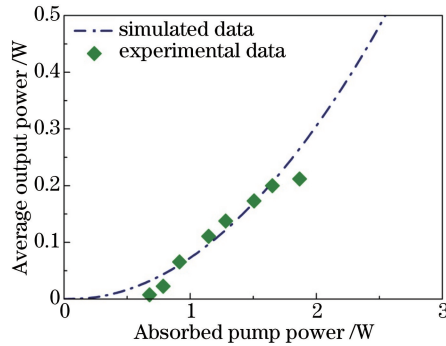


图 8 增益介质中 Nd^{3+} 掺杂浓度为 1% 时平均输出功率随吸收抽运功率变化的模拟结果与实验结果对比

Fig. 8 Simulated and experimental relationship between average output power and absorbed pump power when the Nd^{3+} concentration in gain material is 1%

加, Nd^{3+} 离子掺杂浓度分别为 1.5% 和 2.4% 时, 输出倍频功率的曲线变化趋势相近; 当 Nd^{3+} 离子掺杂浓度为 3% 时, 输出倍频功率最高; Nd^{3+} 离子掺杂浓度高于 3% 后, 输出倍频功率有明显下降趋势, 当 Nd^{3+} 离子掺杂浓度达到 6.8% 后, 输出倍频功率变化趋势缓慢, 输出倍频功率小于 0.2 W。

图 10 给出不同 Nd^{3+} 离子掺杂浓度的增益介质随抽运功率变化的输出倍频功率变化曲线。随着抽运功率的增加, 不同掺杂浓度下的输出倍频功率都呈增加趋势。 Nd^{3+} 离子掺杂浓度为 3% 时, 输出倍频功率增加的变化趋势最大, Nd^{3+} 离子掺杂浓度大于 3% 时, 输出倍频功率的变化趋势缓慢。相同抽运功率下, 输出倍频功率随掺杂浓度的增加呈先增大后减小的趋势。在 Nd^{3+} 离子掺杂浓度为 3% 时获得最大输出倍频功率, Nd^{3+} 离子掺杂浓度大于 3% 后输出倍频功率急剧下降。这要是因为随着 Nd^{3+} 离子掺杂浓度的增加, 晶体的荧光寿命缩短、腔内损耗增大等原因限制了输出倍频功率。因此, 要获得更大的输出倍频功率和更高的光-光转换效率, 可用一定高掺杂浓度范围内的掺 Nd^{3+} 离子激光材料作为增益介质。

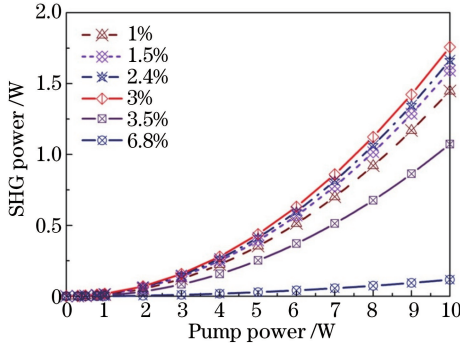


图 9 不同 Nd^{3+} 掺杂浓度增益介质的输出倍频功率

Fig. 9 Second harmonic generation (SHG) power for different Nd^{3+} concentrations

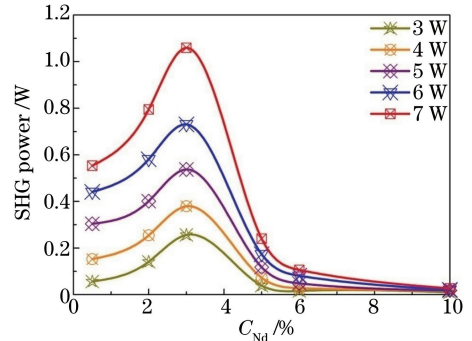


图 10 不同 Nd^{3+} 掺杂浓度增益介质随抽运功率变化的输出倍频功率

Fig. 10 SHG power versus pump power for different Nd^{3+} concentrations

4 结 论

在室温下采用 885 nm LD 直接端面抽运 Cr, Nd:YAG/GTR-KTP 腔内倍频实现了高效稳定的自调 Q 脉冲绿光激光输出。当吸收抽运光功率为 1.65 W 时, 获得了 200 mW 自调 Q 脉冲绿光激光输出, 相应的光-光转换效率为 12.1%。当吸收抽运光功率大于 1.15 W 时, 获得了脉冲能量大于 8 μJ 和峰值功率超过 1 kW 的自调 Q 脉冲绿光激光输出。绿光激光器未加主动冷却装置在室温下工作 2 h, 平均绿光输出功率抖动小于 2.1%。通过对不同 Nd^{3+} 离子掺杂浓度增益介质输出倍频功率的模拟仿真发现, 一定范围内增大 Nd^{3+} 离子掺杂浓度有利于提高输出倍频功率, 而且 Nd^{3+} 离子掺杂浓度为 3% 时可以使输出倍频功率最大化, 这为下一步实验提供了参考。

参 考 文 献

- [1] Zhou S H, Lee K K, Chen Y C, *et al.* Monolithic self-Q-switched Cr,Nd:YAG laser[J]. Optics Letters, 1993, 18(7): 511-512.
- [2] Dong J, Deng P Z, Lu Y T, *et al.* Laser-diode-pumped Cr⁴⁺,Nd³⁺:YAG with self-Q-switched laser output of 1.4 W[J]. Optics Letters, 2000, 25(15): 1101-1103.
- [3] Dong J, Lu J R, Ueda K. Experiments and numerical simulation of a diode-laser-pumped Cr,Nd:YAG self-Q-switched laser[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2004, 21(12): 2130-2136.
- [4] Dong J, Ueda K. Longitudinal-mode competition induced instabilities of Cr⁴⁺,Nd³⁺:Y₃Al₅O₁₂ self-Q-switched two-mode laser[J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(15): 151102.
- [5] Jiang M, Zhang Q L, Qiu K S, *et al.* Self-Q-switched Cr,Nd:YAG laser under direct 885 nm diode laser pumping[J]. Optics Communications, 2012, 285(18): 3684-3687.
- [6] Gui Shixin, Chang Jianhua, Yan Na, *et al.* A compact and highly efficient intracavity frequency-doubled green laser based on periodically poled lithium niobate[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(11): 1102002.
桂诗信, 常建华, 颜娜, 等. 一种基于铌酸锂晶体的高效紧凑腔内倍频绿光激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1102002.
- [7] Zhang Xin, Zhang Hengli, Mao Yefei, *et al.* Efficient methods of green output by second harmonic generation with short pulse broad-band laser[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(2): 0202003.
张新, 张恒利, 毛叶飞, 等. 高效短脉冲宽带倍频绿光实现方法[J]. 中国激光, 2016, 43(2): 0202003.
- [8] Xu Zhen, Wei Xiaoyu, Wu Nianle. Intracavity frequency-doubled LD pumped self-Q-switched Cr⁴⁺, Nd³⁺:YAG green laser[J]. Quantum Electron, 2003, 20(4): 410-414.
徐震, 魏晓羽, 吴念乐. LD泵浦 Cr⁴⁺,Nd³⁺:YAG 自调 Q 腔内倍频激光器研究[J]. 量子电子学报, 2003, 20(4): 410-414.
- [9] Du S F, Wang S M, Zhang D X, *et al.* Diode end-pumped self-Q-switched and mode-locked Nd,Cr:YAG KTP green laser[J]. Chinese Physics, 2006, 15(7): 1522-1525.
- [10] Du S F, Wang S M, Zhang D X, *et al.* Green output of 1.5 W from a diode-pumped intracavity frequency-doubled self-Q-switched and mode-locked Cr,Nd YAG laser[J]. Chinese Physics Letters, 2007, 24(11): 3149-3152.
- [11] Bai S C, Dong J, Zhou X. An efficient, watt-class intracavity frequency doubled Cr,Nd:YAG/KTP miniature green laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(9): 848-850.
- [12] Bai S C, Dong J. GTR-KTP enhanced stable intracavity frequency doubled Cr,Nd:YAG self-Q-switched green laser[J]. Laser Physics, 2015, 25(2): 025002.
- [13] Shi Yuxian, Lu Tielin, Feng Baohua, *et al.* Thermal effect analysis of Nd:CNGG 935 nm laser pumped by 885 nm and 808 nm diode lasers[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1102004.
施玉显, 卢铁林, 冯宝华, 等. 885 nm 和 808 nm LD 抽运 Nd:CNGG 935 nm 激光器热效应研究[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1102004.
- [14] Lupei V, Pavel N, Taira T. 1064 nm laser emission of highly doped Nd:ytrium aluminum garnet under 885 nm diode laser pumping[J]. Applied Physics Letters, 2002, 80(23): 4309-4311.
- [15] Cao Mengjun. 885 nm LD directly pumped Cr,Nd:YAG/KTP intracavity frequency doubled self-Q-switched miniature green laser[D]. Xiamen: Xiamen University, 2013.
曹梦军. 885 nm LD 直接泵浦 Cr,Nd:YAG/KTP 腔内倍频自调 Q 小型化绿光激光器研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2013.
- [16] Liu W M, Zhang X. Efficiency intracavity frequency-doubled Nd:CNGG-LBO green laser at 530.5 nm under direct 885 nm pumping into the emitting level[J]. Laser Physics, 2011, 21(10): 1725-1728.
- [17] Gao J, Zhang L, Sun H X, *et al.* High-power continuous-wave yellow-green laser at 558 nm under in-band pumping[J]. Optics Communications, 2014, 319(10): 110-112.
- [18] Yao W M, Gao J, Zhang L, *et al.* Continuous-wave yellow-green laser at 0.56 μm based on frequency doubling of a diode-end-pumped ceramic Nd:YAG laser[J]. Applied Optics, 2015, 54(18): 5817-5821.
- [19] Shoji I, Kurimura S, Sato Y, *et al.* Optical properties and laser characteristics of highly Nd³⁺-doped Y₃Al₅O₁₂

- ceramics[J]. Applied Physics Letters, 2000, 77(7): 939-941.
- [20] Taira T, Kurimura S, Saikawa J, *et al.* Highly trivalent neodymium ion doped YAG ceramic for microchip lasers[J]. Advanced Solid State Lasers, 1999, 26(3): 212-215.
- [21] Ikesue Akio. Polycrystalline Nd:YAG ceramics lasers[J]. Optical Materials, 2002, 19(1): 183-187.
- [22] Ikesue A, Taira T, Sato Y, *et al.* High-performance microchip lasers using polycrystalline Nd:YAG ceramics[J]. Journal of the Ceramic Society of Japan, 2000, 108(4): 428-430.
- [23] Lupei V, Lupei A, Georgescu S, *et al.* The effect of Nd concentration on the spectroscopic and emission decay properties of highly doped Nd:YAG ceramics[J]. Physical Review B, 2001, 64(9): 092102.
- [24] Lupei V, Aka G. Enhanced 532 nm emission by frequency-doubling of the one-micron Nd:yttrium vanadate laser in gadolinium calcium oxoborate[J]. Journal of Applied Physics, 2005, 97(5): 056104.
- [25] Lupei V, Pavel N, Taira T. Efficient laser emission in concentrated Nd laser materials under pumping into the emitting level[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2002, 38(3): 240-245.
- [26] Danielmeyer H G, Bltte M, Balmer P. Fluorescence quenching in Nd:YAG[J]. Applied Physics, 1973, 1(5): 269-274.
- [27] Degnan J J. Optimization of passively Q-switched lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1995, 31(11): 1890-1901.
- [28] Liu J G, Kim D. Optimization of intracavity doubled passively Q-switched solid-state lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1999, 35(11): 1724-1730.