

紧凑型全固态 266nm 脉冲激光器

张 辰,高兰兰,邵志强
(长春理工大学理学院,吉林 长春 130022)

摘要:报道了利用激光二极管端面抽运 Nd:YAG 晶体,通过 Cr⁴⁺:YAG 晶体可饱和吸收被动调 Q,KTP 晶体腔外倍频及 BBO 晶体腔外四倍频,实现 266 nm 连续脉冲输出。简要分析了被动调 Q 基本原理,计算并模拟了 1064 nm 基频光在理想状态下 Cr⁴⁺:YAG 晶体不同初始透过率对脉冲激光单脉冲能量的影响。LD 抽运功率为 4.8 W 时,得到 266 nm 紫外激光平均输出功率为 5.63 mW,单脉冲能量约为 0.5 μJ。在紧凑型毫瓦级 266 nm 激光器实用化方面取得了一定进展。

关键词:全固态;266 nm;被动调 Q;脉冲;倍频

中图分类号:TN248.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2014.05.004

Compact all-solid-state 266 nm pulse laser

ZHANG Chen, GAO Lan-lan, SHAO Zhi-qiang

(College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: 266 nm ultraviolet pulse laser is achieved by KTP crystal extra-cavity frequency doubling and BBO crystal extra-cavity frequency quadrupling of a laser in Nd:YAG end-pumped by LD and passively Q-switched by Cr⁴⁺:YAG. The basic principle of passively Q-switched is analyzed, and the influence of the initial transmission of the Cr⁴⁺:YAG on single pulse energy of the 1064nm laser under the ideal condition is calculated and simulated. When the pump power is 4.8W, the output power of 5.63mW and single pulse energy of 0.5μJ at 266 nm laser is obtained. Certain progress of practicability of compact milliwatt levels 266nm laser has been made.

Key words: all-solid-state; 266 nm; passively Q-switched; pulse; frequency doubling

1 引言

紫外波段激光器(Ultraviolet, UV),由于波长短,能量更集中,分辨率高,在工业零部件加工、微电子学、光谱分析及医疗等领域有着广泛的应用前景。特别是在工业加工领域,由于UV激光的短波长和高光子能量特点,其聚焦光斑可以更小,同时高能量UV光子直接破坏材料的分子键,加工的尺寸可以更小,加工的精度得到提高^[1]。以355 nm和266 nm为代表的全固态UV激光在工业加工领域已经得到了广泛应用。

2006年,中国科学院物理研究所报道了采用CLBO晶体对平均功率120 W绿光激光器进行倍频,

得到28.4 W的266 nm UV激光^[2]。2007年,中科院物理研究所耿爱丛等,做出了平均功率1.3 W的实用化266 nm激光器^[3]。2012年,赵书云等报道平均功率1.12W的实用化266 nm激光器^[4]。

目前,国内外对实用化266 nm激光器的研究与报道仍集中在大功率LD或其列阵作泵浦源来实现

基金项目:长春市科技局项目(No. 2011101);汽车仿真与控制国家重点实验室开放基金(No. 20111108)资助。

作者简介:张 辰(1988-),男,硕士研究生,主要从事全固态激光技术及非线性频率变换技术等方面的研究。E-mail: zc_ark@163.com

收稿日期:2013-09-24

紫外激光输出,而毫瓦级实用化 LD 泵浦 266 nm 激光器的研究与报道依然不多。

本文简要分析了被动调 Q 基本原理,并计算了理想状态下可饱和吸收晶体不同初始透过率对脉冲激光单脉冲能量的影响,采用最大功率 5W 单管 LD 端面泵浦 Nd : YAG 晶体, Cr⁴⁺ : YAG 晶体被动调 Q 产生 1064 nm 脉冲激光,腔外倍频及四倍频的方式,产生平均功率为 5.6 mW,单脉冲能量 0.5 μJ 的 266 nm 脉冲激光。在毫瓦级、小功率、紧凑型、实用化激光器方面取得了一定进展。

2 理论分析

由激光原理知,基频光波到倍频光波的转化效率为:

$$\eta = \frac{2\omega_1^2 L^2 d_{\text{eff}}^2}{c^3 n_1^2 n_2} I_1(0) \text{sinc}^2(\Delta k L / 2) \quad (1)$$

式中, L 为倍频晶体的长度; d_{eff} 是倍频晶体的非线性有效系数; n_1 是基频光在倍频晶体中的折射率; n_2 是倍频光在倍频晶体中的折射率; c 是真空中光速; $I_1(0)$ 为入射的基频光的光强; ω_1 为入射的基频光频率。由式(1)知,倍频转换效率正比于入射的基频光波的功率密度,基频光的功率密度越高,倍频转换效率也越高。因此,在腔外倍频全固态激光器中,我们可以通过腔内调 Q 的方式,获得峰值功率密度高、单脉冲能量高的基频光,从而提高倍频转换效率。对于脉冲激光,单脉冲能量越大,脉冲宽度越窄,则脉冲峰值功率越高,倍频转换效率越高^[5-6]。

被动调 Q 激光器的动态特性可以通过相应的速率方程组来描述。根据被动调 Q 理论^[7-9],考虑可饱和吸收体 ESA 的被动调 Q 速率方程组可以写为:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\phi}{t_r} \left[2\sigma l - 2\sigma_{gs} n_{gs} l_s - 2\sigma_{es} n_{es} l_s - \left(\ln\left(\frac{1}{R}\right) + L \right) \right] \quad (2)$$

$$\frac{dn}{dt} = -\gamma c \sigma \phi n - \frac{n}{\tau} + W_p \quad (3)$$

$$\frac{dn_{gs}}{dt} = -\sigma_{gs} c \phi n_{gs} + \frac{n_{s0} - n_{gs}}{\tau_s} \quad (4)$$

$$n_{gs} + n_{es} = n_{s0} \quad (5)$$

式中, ϕ 是谐振腔中的光子数密度; n 是瞬间反转粒子数密度; n_{gs} 和 n_{es} 分别是 Cr⁴⁺ : YAG 晶体中基态和激发态的粒子数密度; σ 是增益介质的受激发射截面; l_1 是增益介质的长度; n_{s0} 是 Cr⁴⁺ : YAG 晶体内总

的粒子数密度; c 是真空中光速; R 是输出镜反射率, l_s 是可饱和吸收体的长度; γ 是增益介质的反转筒并因子(对 Nd : YAG 晶体 $\gamma = 1$); $t_r = 2l_2/c$, 是光在光程长为 l_2 的谐振腔内往返的时间, σ_{gs} 是可饱和吸收体的基态吸收截面; σ_{es} 是 Cr⁴⁺ : YAG 晶体的激发态吸收截面; τ_s 是 Cr⁴⁺ : YAG 晶体的激发态寿命; τ 是增益介质的上能级寿命; W_p 是泵浦速率; L 是腔内耗散性损耗(设 $L = 0.05$)。

泵浦开始时,腔内光子数很低, Cr⁴⁺ : YAG 粒子绝大多数处在基态,在 Cr⁴⁺ : YAG 达到饱和之前,我们可以认为式(2)左边为 0,同时, $n_{gs} = n_{s0}$ 。则可得初始粒子数密度:

$$n_i = \frac{2\sigma_{gs} n_{s0} l_s + \ln(1/R) + L}{2\sigma l} \quad (6)$$

随着抽运继续, Cr⁴⁺ : YAG 晶体内处于基态的粒子数被激发到激发态,令 $n_{gs} = 0$, 阈值反转粒子数密度 n_t 为:

$$n_t = \frac{2\sigma_{es} n_{s0} l_s + \ln(1/R) + L}{2\sigma l} \quad (7)$$

在调 Q 激光脉冲输出以后,腔内反转粒子数迅速减少到阈值反转粒子数以下,得到剩余反转粒子数密度 n_f :

$$n_i - n_f - n_t \ln\left(\frac{n_i}{n_f}\right) = 0 \quad (8)$$

从以上几式可以看出,对于被动调 Q 激光器,初始反转粒子数密度 n_i 与抽运速率 W_p 无关^[7]。被动调 Q 激光器输出脉冲能量、峰值功率、脉宽与 Cr⁴⁺ : YAG 晶体初始透过率 T_0 及输出镜反射率 R 有关,具体公式如下^[8]:

$$E = \frac{h\nu A}{2\sigma\gamma} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \ln\left(\frac{n_i}{n_f}\right) \quad (9)$$

$$P = \frac{h\nu A l_1}{2\sigma\gamma} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \left\{ n_i - n_t \left[1 + \ln\left(\frac{n_i}{n_t}\right) \right] \right\} \quad (10)$$

$$\tau_p = \frac{E}{P} \quad (11)$$

式中, E 为单脉冲能量; P 为峰值功率; τ_p 为单脉冲宽度; $h\nu$ 为振荡光子能量; A 为光束在 Cr⁴⁺ : YAG 中的有效截面积。

Cr⁴⁺ : YAG 晶体初始透过率为^[9-10]:

$$T_0 = \exp(-\sigma_{gs} n_{s0} l_s) \quad (12)$$

由上式可知,可通过求解 n_i 、 n_t 及 n_f , 并根据工作物质,输出镜及 Cr⁴⁺ : YAG 晶体的相关参数,模拟计算被动调 Q 激光器的输出峰值功率、脉冲能量和

脉冲宽度。

表 1、表 2 为数值模拟所用参数。表 1 为 Cr⁴⁺:YAG 晶体及本实验中所用到的 Nd:YAG 晶体参数,表 2 为本实验中所用激光器参数,将其代入公式(9)~(11),可模拟激光器输出特性与 Cr⁴⁺:YAG 晶体初始透过率关系^[11]。其中 $h\nu$ 为 1064 nm 激光振荡光子能量。实验中我们所用的激光器等效谐振腔长约为 16 mm 左右,故激光在谐振腔内往返一周时间约为 0.11 ns。在实验中我们所用的输出镜对 1064 nm 激光反射率为 90%。

表 1 Cr⁴⁺:YAG 及 Nd:YAG 晶体相关参数

Tab. 1 The parameters of Cr⁴⁺:YAG and Nd:YAG

参数	取值
σ	$2.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$
σ_{gs}	$3.2 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$
σ_{es}	$4.5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$
γ	1
$h\nu$	$1.86 \times 10^{-19} \text{ J}$
l_1	0.5 cm

表 2 本实验中所用激光器的参数

Tab. 2 The parameters of the laser used in this experiment

参数	取值
t_r	0.11 ns
l_2	16 mm
A	0.001 cm^2
R	0.9
L	0.05

将表 1 参数代入公式,通过 Matlab 模拟,可以得出被动调 Q 激光器单脉冲能量及脉冲宽度与 Cr⁴⁺:YAG 晶体初始透过率关系,如图 1 和图 2 所示。计算得到 Cr⁴⁺:YAG 晶体初始透过率为 76.1% 时,1064 nm 基频光单脉冲能量为 52.7 μJ ,脉冲宽度为 0.9 ns。

随着 Cr⁴⁺:YAG 晶体初始透过率的提高,脉冲激光单脉冲能量随之变小,脉冲宽度随之变宽。由于 Cr⁴⁺:YAG 初始透过率增加,谐振腔内损耗变小,致使激光器的阈值也相应变小。在同样的注入电流下,反转粒子数达到阈值所需的时间变短,调 Q 建立的时间变短了,所以调 Q 脉冲输出单脉冲能量也随之变小。而激光器阈值的减小,使工作物质中上能级粒子数密度减小,脉冲的时间

和熄灭的过程需要的时间变长,输出的调 Q 脉冲宽度随之变宽。

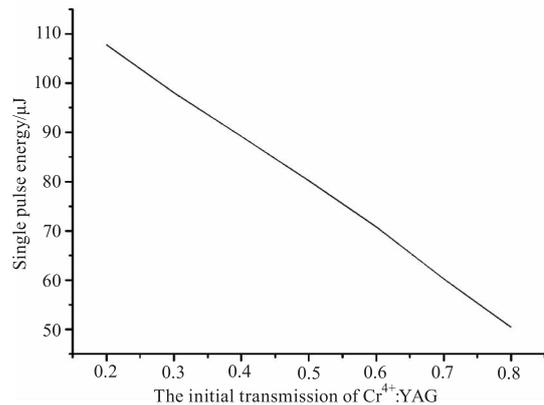


图 1 单脉冲能量与 Cr⁴⁺:YAG 晶体初始透过率关系

Fig. 1 Single pulse energy vs. initial transmission of Cr⁴⁺:YAG crystal

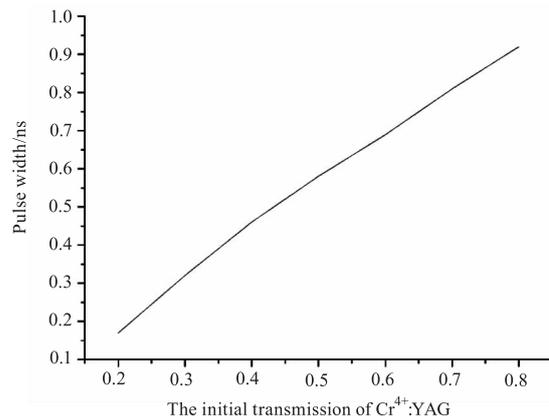


图 2 脉冲宽度与 Cr⁴⁺:YAG 晶体初始透过率关系

Fig. 2 Pulse width vs. initial transmission of Cr⁴⁺:YAG crystal

3 实验装置

实验装置如图 3 所示。M1 为凹面镜,曲率半径为 50 mm,镀有 808 nm 高透和 1064 nm 高反射膜。M2 为平面镜,镀有 1064 nm 部分反射膜, $T = 10\%$ 。M1、M2 构成 1064 nm 基频光谐振腔,两镜相距 15 mm。LD 最大输出功率为 4.8 W,中心波长为 808 nm。工作物质为 Nd:YAG 晶体,尺寸为 $\phi 3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,掺杂浓度为 1.0%,两端镀有 808 nm 和 1064 nm 双增透膜。采用 Cr⁴⁺:YAG 晶体被动调 Q。Cr⁴⁺:YAG 晶体厚度为 2 mm,初始透过率为 76.1%。

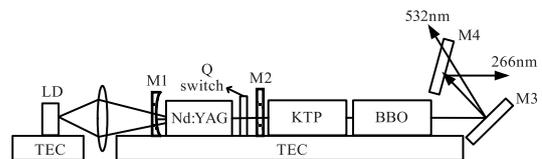


图 3 实验装置图

Fig. 3 Schematic of experimental setup

试验中选用 II 类临界相位匹配 KTP 晶体进行倍频,KTP 晶体两面镀 1064 nm 和 532 nm 双增透

膜,尺寸为 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 9\text{ mm}$,切割角 $\theta = 90.0^\circ$, $\phi = 25.2^\circ$,此时有效非线性系数为 3.58 pm/V ,为了实现 II 类临界相位匹配,KTP 晶体光轴与水平成 45° 放置。采用 BBO 晶体作为四倍频晶体。BBO 晶体双面镀 1064 nm 、 532 nm 和 266 nm 增透膜,其切割角 $\theta = 44.7^\circ$ 。

实验中采用分光光栅 M3 进行分光,反射镜 M4 镀有 266 nm 高反射膜,及 532 nm 增透膜。由于系统经过调 Q 后可以达到较高的峰值功率,因此未采用额外的聚焦系统,这样使整个系统非常紧凑。装置中采用的晶体用铝箔包裹,放入铜槽并用 TEC 温控。

4 实验结果

在实验中,首先不放入 KTP 晶体与 BBO 晶体,M1 与 M2 构成 1064 nm 激光谐振腔,LD 泵浦功率 4.8 W 时,获得平均功率 551 mW 的 1064 nm 脉冲激光,此时重复频率为 11.39 kHz ,单脉冲能量约为 $48.4\text{ }\mu\text{J}$,与理论计算值接近。而脉冲宽度约为 10 ns ,是因为实际实验中工作物质中心的反转粒子数密度与边缘反转粒子数密度有差别,使得实际输出脉冲是由许多建立时间不同的脉冲叠加,所以造成与实际调 Q 脉冲建立时间有一定的差距,造成实际输出被动调 Q 脉冲宽度变大。

然后将 KTP 晶体直接放在 M1、M2 腔外,尽量接近 M2 位置,此时构成腔外倍频 532 nm 激光器的结构,获得 532 nm 绿光输出,LD 抽运功率为 4.8 W 时,绿光平均功率为 159.5 mW ,脉冲宽度约为 5 ns ,单脉冲能量为 $14\text{ }\mu\text{J}$ 。图 4 为 532 nm 激光平均功率随 LD 抽运功率变化曲线。

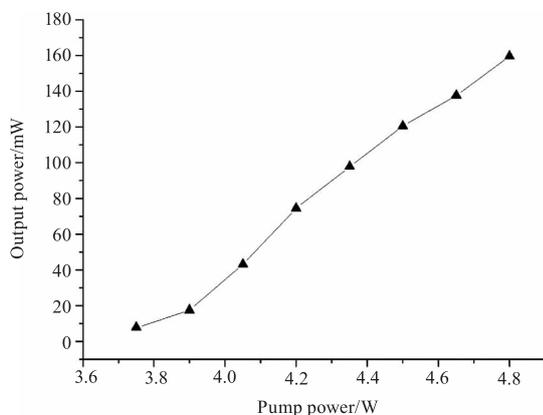


图 4 532 nm 平均功率随 LD 抽运功率的变化曲线

Fig. 4 Output power at 532 nm vs. LD power

然后将 BBO 晶体置于 KTP 晶体之后,尽量接近 KTP 晶体位置,得到 266 nm 紫外激光输出。当 LD 抽运功率为 4.8 W , 532 nm 绿光平均功率 159.5 mW 时,输出的 266 nm 紫外激光平均功率为

5.63 mW ,单脉冲能量约为 $0.5\text{ }\mu\text{J}$ 。图 5 为 266 nm 紫外激光平均功率随 LD 抽运功率变化曲线。

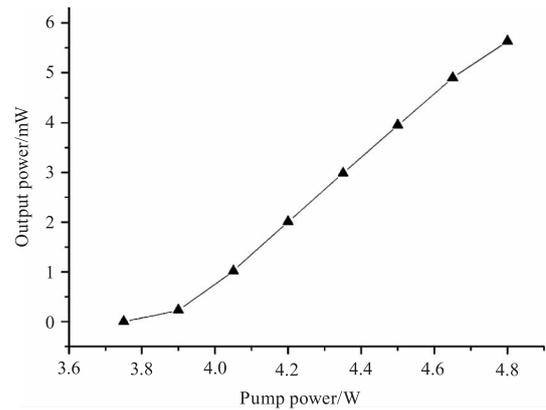


图 5 266 nm 激光平均功率随 LD 抽运功率的变化曲线

Fig. 5 Output power at 266 nm vs. LD power

图 6 为 266 nm 激光光斑,如图所示, 266 nm 激光光斑成椭圆形,这是由 BBO 晶体走离效应所致。

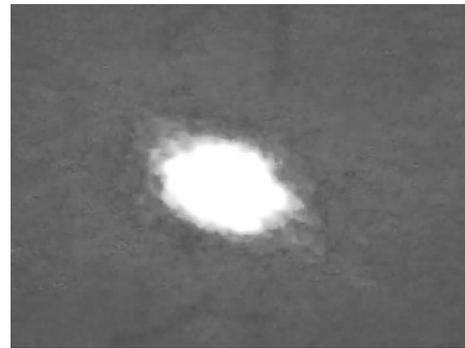


图 6 266 nm 激光光斑图

Fig. 6 Spot shape of the 266 nm laser

5 结论

通过分析被动调 Q 基本原理,计算并模拟了 LD 泵浦 Nd : YAG 激光器在理想状态下脉冲 1064 nm 基频光在 Cr^{4+} :YAG 不同初始透过率时的单脉冲能量,并与实验过程中得到的数据进行了对比,得到了相近的结果。

采用 LD 端面抽运 Nd : YAG 晶体,利用 Cr^{4+} :YAG 的可饱和吸收被动调 Q,KTP 晶体倍频,获得 532 nm 脉冲输出,再经 BBO 晶体四倍频,实现 266 nm 连续脉冲输出。在 LD 注入功率为 4.8 W 时得到 266 nm 紫外光的平均输出功率为 5.63 mW ,单脉冲能量为 $0.5\text{ }\mu\text{J}$ 。实现了小功率全固态 266 nm 紫外激光器。

实验过本实验中不足之处在于由于实验条件限制,未采用初始透过率不同的被动调 Q 晶体进行对比实验,以继续提高激光单脉冲能量及峰值功率。

此激光器采用直型谐振腔设计,结构简单紧凑,

调节容易,成本较低,在小功率 266 nm 紫外激光器实用化方面取得了一定的进展。

参考文献:

- [1] YU Jun, ZENG Zhijiang, ZHU Sangan et al. Research on advantages of UV laser in fine progressing technology[J]. Infrared, 2008, 29(6): 9-13. (in Chinese)
俞君, 曾智江, 朱三根, 等. 紫外激光在微细加工技术中的优势研究[J]. 红外, 2008, 29(6): 9-13.
- [2] LIU Qiang, YAN Xingpeng, CHEN Hailong, et al. New progress in high-power All-solid-state ultraviolet laser[J]. Chinese Journal of Laser, 2010, 37(9): 2289-2298. (in Chinese)
柳强, 闫兴鹏, 陈海龙, 等. 高功率全固态紫外激光器研究新进展[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2289-2298.
- [3] GENG Aicong, ZHANG Hongbo, WANG Guiling, et al. Practical All-solid-state 266 nm laser[J]. Jernal of Optoelectronics · Laser, 2007, 18(7): 767-769. (in Chinese)
耿爰丛, 张鸿博, 王桂玲, 等. 实用化全固态 266nm 激光器的研究[J]. 光电子 · 激光, 2007, 18(7): 767-769.
- [4] ZHAO Shuyun, XIAO Lei, WANG Xu, et al. Study on a practical 266nm ultraviolet laser[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(8): 883-886. (in Chinese)
赵书云, 肖磊, 王旭, 等. 实用化 266nm 紫外激光器的研究[J]. 激光与红外, 2012, 42(8): 883-886.
- [5] YAN Jixiang. Laser principle and technology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004. (in Chinese)
- 阎吉祥. 激光原理与技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [6] YAO Jianquan, XU Degang. All solid state laser and non-linear optical frequency conversion technology[M]. Beijing: Science Press, 2007.
姚建铨, 徐德刚. 非线性光学频率变换及激光调谐技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [7] J Dong. Numerical modeling of CW-pumped repetitively passively Q-switched Yb : YAG lasers with Cr : YAG as saturable absorber [J]. Optics Communications, 2003, 226: 337-344.
- [8] John J Degnan. Theory of the optimally coupled Q-switched laser[J]. JEEE Journal of Quantum Electronics, 1989, 25(2): 214-220.
- [9] Koechner W. Solid-state laser engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
W 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [10] Y F Chen, Y P Lan, H L Chang. Analytical model for design criteria of passively Q-switched lasers [J]. JEEE Journal of Quantum Electronics, 2001, 37(3): 462-468.
- [11] XU Tao. The characteristics of LD Side-pulse pumping Nd : YAG passive Q-switch laser[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012.
许韬. LD 侧面脉冲抽运 Nd : YAG 被动调 Q 激光特性研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.