

doi:10.3788/gzxb20184711.1114004

适用于水下同步照明的灯泵浦绿光激光器研制

叶庆^{1,2}, 范一松^{1,3}, 卞进田^{1,2}, 俞峰^{1,2}, 苏锐³

(1 国防科技大学 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037)

(2 先进激光技术安徽省实验室, 合肥 230037)

(3 中国科学院合肥物质科学研究院 安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘 要:研制了脉冲宽度大、单脉冲能量大的绿光激光器,其中脉冲重复频率与高速相机帧频同步,且光纤耦合输出.激光器采用平凸非稳腔结构,灯泵浦 Nd:YAG 晶体, KTP 晶体内腔倍频,被动调 Q 方式,实现了最大重复频率为 300 Hz、脉冲宽度为 70 μ s、平均功率为 38 W、单脉冲能量为 126.7 mJ、光束发散角为 3.5 mrad 的 532 nm 激光输出.将该激光耦合到芯径为 800 μ m 的光纤中进行水下实验,耦合效率达到 92%.

关键词:灯泵激光器; 激光照明; KTP 内腔倍频; 水下光源; 被动调 Q; 光纤耦合

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)11-1114004-9

Development of a Green Laser Pumped by Flash Lamp Applicable to Underwater Synchronous Lightening

YE Qing^{1,2}, FAN Yi-song^{1,3}, BIAN Jin-tian^{1,2}, YU Feng^{1,2}, SU Rui³

(1 State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defence Technology, Hefei 230037, China)

(2 Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei 230037, China)

(3 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Green laser with large pulse width and high single pulse energy was developed, which has a pulse repetition frequency synchronized with high speed camera frame frequency and is applicable for fiber coupling output. Together with the application of plano-convex unstable resonator, the laser was equipped with a flash-lamp pumped Nd:YAG crystal, a KTP crystal for intracavity frequency doubling and a passive Q-switching crystal. A laser light output was realized with a wavelength of 532 nm, the maximum repetition rate was 300 Hz, the pulse width was 70 μ s, the average power was 38 W, the single pulse energy was 126.7 mJ and the divergence angle was 3.5 mrad. The laser was further coupled to an underwater fiber of 800 μ m in diameter, achieving a 92% coupling efficiency.

Key words: Flash-lamp pumped laser; Laser illumination; Intracavity frequency double by KTP crystal; Underwater light source; Passive Q-switching; Fiber coupling

OCIS Codes: 140.0140; 140.3510; 140.3538; 140.3540

0 引言

波长为 450~550 nm、介于蓝光和绿光之间的光称作“蓝绿光”.20 世纪 70 年代初,美国研究人员率先发现当蓝绿光的波长选用合适时,海水对它的光吸收损耗很小,甚至是“透明”的,这种现象称为海水的“蓝绿窗口”^[1].蓝绿激光具有好的方向性、单色性、相干性以及高亮度,是开展水下照明、探测和对潜通信的理想光源.目前对 Nd:YAG 激光进行倍频是获得高功率蓝绿光的重要方法^[2],按泵浦方式不同可分为半导体泵浦和闪光灯泵浦两种^[3].近年来,国内外蓝绿激光器发展十分迅速,正朝着高功率、紧凑型、低成本、实用化等方

基金项目:脉冲功率激光技术国家重点实验室主任基金(No.SK2015ZR01)资助

第一作者:叶庆(1981—),男,助理研究员,博士,主要研究方向为固体激光器技术. Email:yeqing0518@sina.com

通讯作者:卞进田(1979—),男,副研究员,博士,主要研究方向为固体激光器技术. Email:bianjt@126.com

收稿日期:2018-09-03;录用日期:2018-10-24

<http://www.photon.ac.cn>

向发展^[4]. 半导体泵浦的全固态绿光激光器即使不采用主动振荡-功率放大 (Master Oscillator Power-Amplifier, MOPA) 技术亦可实现平均功率百瓦以上的输出. 例如, 美国的 Coherent 公司实现了平均功率 400 W、10 kHz、单脉冲能量 42 mJ 的绿光激光器^[2]. 国内耿爱丛等采用双棒串联、L 型腔、声光调 Q、腔内倍频研制了平均功率 140 W、10kHz、单脉冲能量 12 mJ 的绿光激光器^[5]. 北京工业大学刘学胜等采用 L 型腔、单棒、双闪光灯泵浦、声光调 Q、腔内倍频, 获得了 10 kHz、63 W、单脉冲能量 6.3 mJ 的绿光激光器^[6]. 虽然目前固体绿光激光器技术体制成熟, 但对不同应用场合, 仍需有针对性地设计. 例如, 在与高速相机同步协调工作的水下激光照明应用中, 上述激光器无法满足要求, 需要重新研制.

为抑制到达相机的反向杂散光, 提高照明能量利用率, 同时减小光源加热对水下环境的影响, 水下激光照明系统采用距离选通技术, 即要求相机快门打开时刻内激光出光, 而快门关闭时刻激光器不工作^[7], 这要求研制的绿光激光器的脉冲重频与相机的帧频同步, 脉宽小于相机的快门开启时间. 水下照明希望相机积分时间内平均光通量尽可能大, 根据光通量与光功率成正比的关系, 在激光重频一定的情况下, 要求单脉冲能量尽可能大, 然而已报道的激光器单脉冲能量都只有几十毫焦, 不能满足水中激光照明高亮度的需求, 需要进一步提高激光的单脉冲能量. 另外, 研制的绿光激光器需要在水下灵活改变出光方向进行不同角度的照明, 需要将产生的大能量照明激光进行光纤耦合输出, 不但要提高耦合效率, 而且脉冲的峰值功率不能过高, 以避免损坏光纤端面. 本文考虑上述因素研制了一种绿光激光器, 能够与高速相机进行同步控制, 具有大的脉冲能量、灵活的输出角度, 可替代现有 LED 进行水下探测.

1 激光器设计

除了进行激光器谐振腔稳定设计与模式分析之外, 与相机同步的水下照明激光器设计还需重点解决三个问题: 一是形成脉冲激光并控制激光的重频与相机的帧频同步; 二是进行调 Q 与倍频理论分析, 提高输出的单脉冲能量; 三是避免高峰值功率激光对光纤端面的损伤进而高效光纤耦合输出.

1.1 谐振腔设计与模式分析

与半导体泵浦的激光器相比, 闪光灯泵浦的固体激光器具有成本低、输出的峰值功率高的优点, 是优选的泵浦方式^[8]. 为补偿热效应, 提高输出光束质量, 研制的绿光激光器谐振腔采用平凸直腔结构^[9], 腔长为

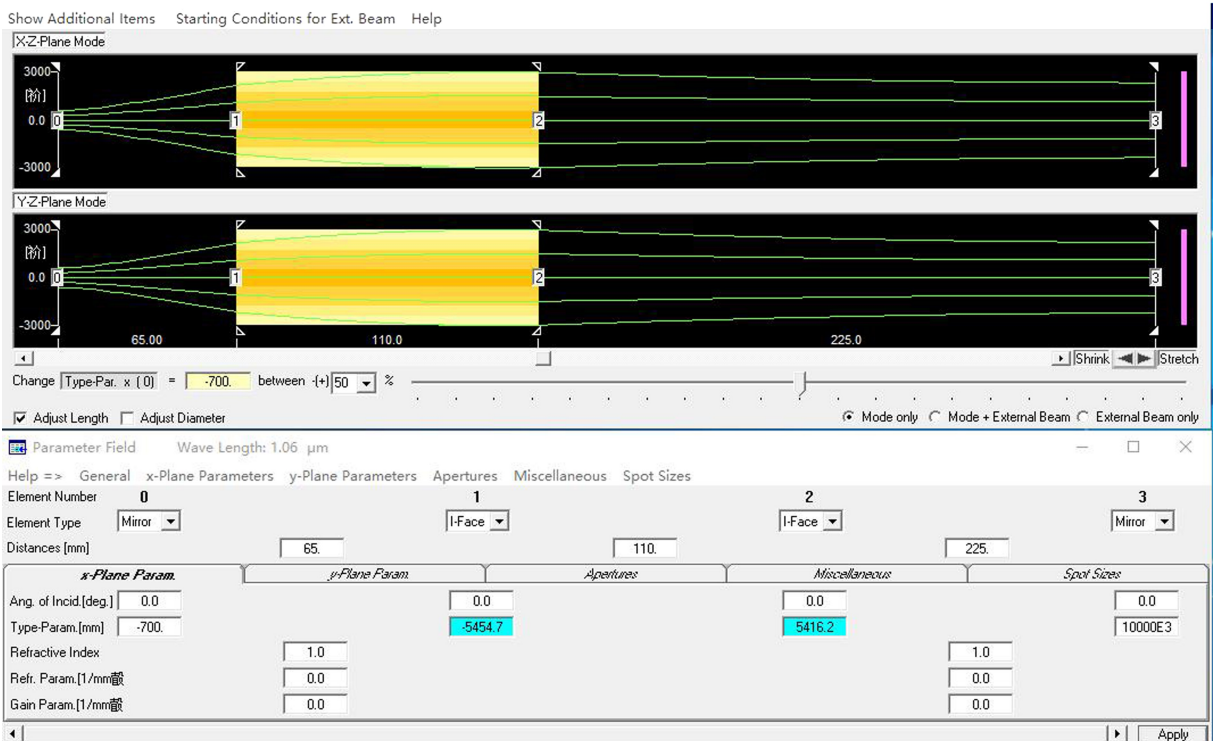


图1 利用 LASCAD 进行谐振腔结构设计示意图

Fig.1 Schematic diagram of structural design of resonator using LASCAD

400 mm,激光晶体选择 Nd:YAG,激光棒直径为 6 mm,长度为 110 mm.用最大为 5 kW 的泵浦电功率作为输入,根据氙灯光谱与激光工作物质吸收光谱匹配程度,并考虑量子亏损,仿真得到泵浦源的热效率为 60%.通过光线追踪软件 TRACEPRO 对单灯单棒椭圆聚光腔进行分析,仿真得到聚光效率为 61.25%.考虑激光晶体的热效应,采用激光腔体设计软件 LASCAD 对谐振腔进行稳定性分析以及连续状态激光模式分析,如图 1.仿真表明,没有加入调 Q 晶体和倍频晶体的谐振腔是稳定腔,多模运转,且激光晶体放置位置不同,腔内模式不同.调 Q 晶体和倍频晶体的加入可看作在腔内再加入具有一定厚度的折射率介质,虽会略微影响腔内激光模式,但不改变谐振腔的稳定性.

1.2 调 Q 选择与同步控制

水下激光照明采用距离选通技术,要求形成脉冲激光的重频与相机的帧频必须严格同步.脉冲激光产生可采用调 Q 技术.调 Q 方式有电光调 Q、声光调 Q 和被动调 Q 三种^[10].电光调 Q 调制电压较高,易对其他电子线路造成干扰,脉宽只有十几纳秒,峰值功率高.声光调 Q 对高能量激光的关断能力较弱,重频较高,通常为几千赫兹.被动调 Q 具有结构简单、体积小、腔内元件少等优点,但产生脉冲时间具有一定随机性.水下激光照明要求光纤耦合输出,需要大脉冲能量和低峰值功率,故声光调 Q 和电光调 Q 都不适合.而被动调 Q 可以通过控制泵浦功率的泵浦能量和时序,在一个泵浦周期内产生多个子脉冲从而同时满足大能量和低峰值功率的需求.

通常工业用高分辨率高速相机帧频通常都是每秒几百帧,相机快门时间为几十微秒到毫秒可调,因此,要求激光器的重频也为几百赫兹,脉宽略小于快门时间,这样可充分利用相机积分时间内脉冲激光能量对所摄物体进行有效照明.例如高速相机采用 MV-UG040GM/C(P),帧频最快可达 300 fps,此时分辨率为 640×480 .随着分辨率增大,帧频变慢.因此,激光器重频应该在 0~300 Hz 范围内可调.由于是被动调 Q,重频大小的调节只能通过控制激光电源的放电周期来完成,并且需要与相机的帧频进行同步控制.

激光器和高速相机同步控制部分包括微处理系统、激光电源系统、激光冷却系统、输入输出系统和高速相机,结构框图如图 2 所示.激光电源采用 RS-485 串口与微处理器进行通信,用于工作参数设定、加电预燃和故障检测等功能.高速相机与激光电源采用外触发同步方式工作,即外部信号触发激光电源充放电从而控制激光器发射激光脉冲,与此同时延时一段来触发相机打开快门.

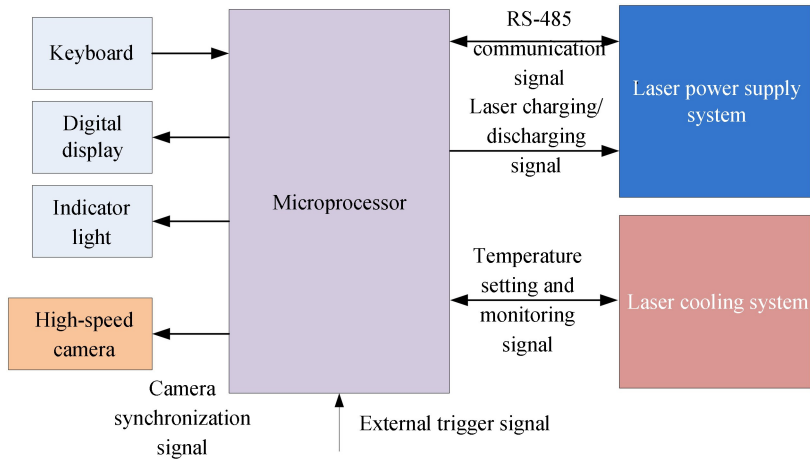


图 2 激光器与相机的同步控制框图

Fig.2 Synchronization control block diagram of laser and camera

整个控制电路的时序如图 3 所示,首先设置放电泵浦脉宽为 $800 \mu\text{s}$,然后在 300 Hz 重频的外部信号触发下,氙灯进行充放电,激光晶体受到泵浦的作用开始粒子数反转.由于采用被动调 Q,刚开始被动调 Q 晶体不透明,谐振腔内处于高损耗、低 Q 值,此时阈值反转粒子数高,所以不产生激光,而是不断积累反转粒子数.当反转粒子数积累达到激光产生的阈值时,激光产生,被动调 Q 晶体被迅速“漂白”变得透明,谐振腔内处于低损耗、高 Q 值,产生激光脉冲.当消耗完反转粒子数后激光脉冲湮灭,被动调 Q 晶体再次变得不透明,将腔关闭,然后等待下一个电脉冲泵浦作用下重复上述过程.虽然被动调 Q 脉冲产生时间相对于外触发信号而言具有一定的随机性,波动通常在几个微秒量级,但相机快门延时可以精确设定,故可以将相机快门延

时设置得稍微比激光脉冲延时短一点,且相机快门设置宽一点,以保证相机每一帧内都有激光脉冲进行照明.

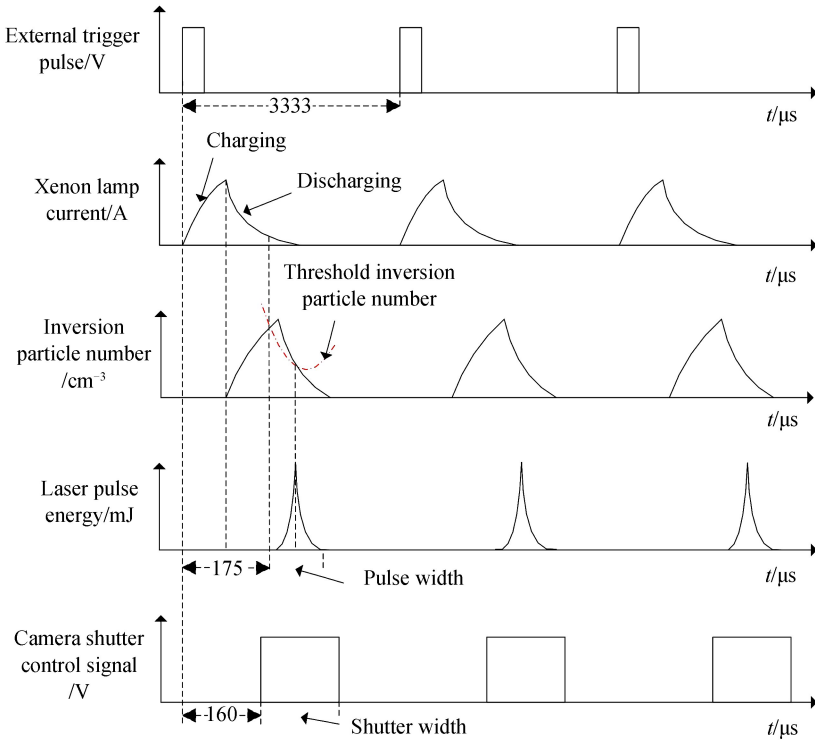


图 3 激光器与相机快门的同步控制时序图

Fig.3 Synchronous control sequence diagram of laser and camera shutter

1.3 倍频方式与速率方程理论

在热管理技术相同的情况下,影响绿光单脉冲能量提高的主要因素有泵浦功率和倍频效率.闪光灯泵浦的固体激光器能量利用率很低,一味提高泵浦的电功率会带来严重的热效应,因此提高绿光单脉冲能量主要从倍频效率上进行分析.

被动调 Q 选择具有大吸收截面、短弛豫时间、高抗损伤阈值的 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体^[10].倍频晶体选择非线性系数大,温度适用性强的磷酸氧钛钾(KTiOPO_4 , KTP)^[11].倍频方式可分为外腔式和内腔式两种.外腔式倍频结构简单,光束单次通过晶体,便于光路调整,在基频激光束峰值功率较高时倍频效率高,但并不适用于对连续或低峰值功率脉冲激光进行倍频,而内腔式倍频可以利用激光往返多次经过倍频晶体的特点来提高倍频效率,是产生大功率蓝绿激光的首选^[12].

被动调 Q 采用具有激发态吸收(Excited State Absorption, ESA)的四能级结构,而倍频过程视为一种对腔内基波的非线性损耗,建立内腔倍频被动调 Q 的基波速率方程为^[13-14]

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = W_p - \sigma c \Phi_\omega N - \frac{N}{\tau} \\ \frac{d\Phi_\omega}{dt} = \frac{\Phi_\omega}{t_r} (2\sigma N l) - \frac{\Phi_\omega}{t_r} \alpha_L(t) - S_{NL} \\ \frac{dN_g}{dt} = -\sigma_g c \Phi_\omega N_g + \frac{N_{s0} - N_g}{\tau_s} \\ N_g + N_e = N_{s0} \end{cases} \quad (1)$$

式中, N 为增益介质的反转粒子数密度, Φ_ω 为腔内基波光子数密度, W_p 为泵浦速率密度, σ 为增益介质的受激发射截面, τ 为增益介质的上能级寿命, c 为光速, t_r 为光子在腔内往返时间, $\alpha_L(t)$ 为 Q 开关及腔内其它线性损耗参数, S_{NL} 为倍频导致的非线性损耗, N_g 和 N_e 分别是可饱和吸收体基态粒子数密度和激发态粒子数密度, N_{s0} 是可饱和吸收体的掺杂离子密度, l 是增益介质的长度, τ_s 是可饱和吸收体的激发态寿命.

而线性损耗参数 $\alpha_L(t)$ 可表示为

$$\alpha_L(t) = \alpha_0 + \alpha_Q \quad (2)$$

式中, $\alpha_0 = \ln(1/R) + \delta$ 为除 Q 开关以外的腔内其它线性损耗参数, R 是输出镜反射率, δ 是腔内的其它无用往返损耗, α_Q 为 Q 开关的饱和吸收损耗参数, 可表示为

$$\alpha_Q = \begin{cases} \sigma_g N_g l_s + \sigma_e N_e l_s & 0 < t < t_c \\ (\sigma_g N_g l_s + \sigma_e N_e l_s) \exp\{-[(t-t_c)/t_s]^2\} & t \geq t_c \end{cases} \quad (3)$$

式中, σ_g 和 σ_e 是可饱和吸收体的基态吸收截面和激发态吸收截面, l_s 是可饱和吸收体的长度, t_c 为 Q 开关打开时间, $\sigma_g N_g l_s + \sigma_e N_e l_s$ 是 Q 开关损耗系数, t_s 为 Q 开关的开关时间常数。

采用准连续闪光灯泵浦, 泵浦脉宽为 t_p , 则一个周期 T 内泵浦速率密度 W_p 可以表示为

$$W_p = \begin{cases} \frac{P_p [1 - e^{-2\alpha t}]}{h\nu_p A_p l} & 0 \leq t \leq t_p \\ 0 & t_p < t < T \end{cases} \quad (4)$$

式中, P_p 为泵浦光功率, α 是增益介质的吸收系数, ν_p 为泵浦光频率, A_p 为泵浦光面积。

增益介质出光瞬间的初始反转粒子数密度 N_i , 阈值反转粒子数密度 N_{th} 及剩余反转粒子数密度 N_f 分别为^[14]

$$\begin{cases} N_i = \frac{2\sigma_g N_{s0} l_s + \ln(1/R) + L}{2\sigma l} \\ N_{th} = \frac{2\sigma_e N_{s0} l_s + \ln(1/R) + L}{2\sigma l} \\ N_i - N_f - N_{th} \ln(N_i/N_f) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

准连续泵浦, 可认为每个周期反转粒子数从 0 增至 N_i , 故 Q 开关打开时间 t_c 可表示为

$$t_c = \tau \ln\left(\frac{W_p \tau}{W_p \tau - N_i}\right) \quad (6)$$

假设饱和调 Q 一个泵浦周期内产生脉冲数为 m , 则 Q 开关打开时间 t_c 与泵浦脉宽 t_p 的关系可表示为

$$\frac{t_p}{m+1} < t_c \leq \frac{t_p}{m} \quad (7)$$

倍频产生的非线性损耗 S_{NL} 可推导出^[15]

$$S_{NL} = \frac{c \Delta \Phi_\omega}{2L} = \frac{16\pi^2 l^2 d_{eff}^2 h\nu}{\epsilon_0^2 n_\omega^2 n_{2\omega} \lambda_\omega^2 L} \Phi_\omega^2 I_\omega^2 \text{sinc}^2(\Delta k l) = \frac{1.4979}{L} \times 10^8 \Phi_\omega \tanh^2(8.934 \times 10^{-8} l \sqrt{\Phi_\omega}) \quad (8)$$

式中, L 是谐振腔腔长, l 为晶体长度, 有效非线性系数 $d_{eff} = 7.36 \times 10^{-12}$ m/V, n_ω 和 $n_{2\omega}$ 分别为基频光和倍频光在晶体中的折射率, λ_ω 为基频光波长, c 为光速, ϵ_0 为真空介电常数, I_ω 为基频光功率密度, Δk 为相位失配量。

由式(5)可知, 小信号时, 相位匹配 ($\Delta k = 0$) 条件下, 倍频转换效率随基频光功率密度和晶体长度增加而增加, 因此在倍频晶体长度一定的情况下, 提高基频光的功率密度是提高倍频效率的根本。被动调 Q 基频光的功率密度与输出镜的反射率 R 以及 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 的小信号透过率 T_0 有关, 通过优化设计, 选择 $R = 70\%$, $T_0 = 30\%$, 仿真获得 Q 开关打开时间 $t_c = 174.6 \mu\text{s}$, 最大透过率 $T_{max} = 84.4\%$, 饱和能量密度 $E_s = 58.4 \text{ mJ/cm}^2$, 激光晶体棒吸收后产生基频光的电光转换效率约为 1.5%。利用 MATLAB 编程, 通过 Q 开关是否打开分步用 Runge-Kutta 法求解瞬态的速率方程式(1), 得到激光

器绿光输出峰值能量和脉宽等参数如图 4 所示。此时绿光单脉冲峰值功率 P_{max} 为 9 kW, 脉宽 τ 为 200 ns。

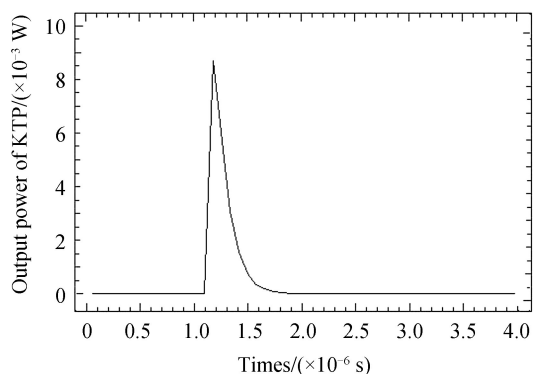


图 4 仿真的绿光脉冲波形

Fig.4 Simulation waveform of green laser pulse

1.4 光纤耦合与脉冲展宽

产生出绿光激光以后,需要耦合进入光纤.耦合效率的大小与很多因素有关,需要具体分析.由于水下照明需要距离目标物 6 m 时照明面积 $\geq 1 \text{ m} \times 5 \text{ m}$,所以设计的激光在耦合的同时还需要整形,在满足光纤耦合条件,根据出射绿光模式特征参数以及光纤的数值孔径,设计耦合透镜组聚焦耦合,如图 5.

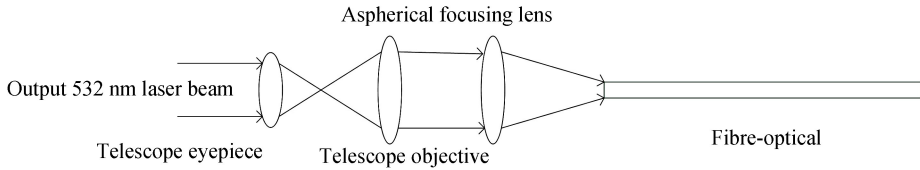


图 5 光纤耦合示意图

Fig.5 Schematic diagram of fiber coupling

光纤耦合部分由望远扩束系统和非球面聚焦镜组成.激光器输出的 532 nm 激光束经过扩束望远镜扩束准直后,被非球面聚焦镜聚焦到长距离传光光纤中进行传输,其中,非球面镜的焦距为 30 mm,直径为 12 mm,扩束望远系统扩束倍率为 2.

然而,上述耦合光学系统设计没有考虑大峰值功率激光对光纤端面的损伤.一旦光纤端面发生损伤,整个系统的耦合效率会急剧下降^[16].光纤表面发生灾难性损伤的原因是等离子产生,等离子点燃的经典判据是

$$(P \times t)^{0.5} \times P^{(\frac{2}{3}-0.5)} \times \lambda^{0.36} > (0.95 \sim 1.5) \times 10^2 \quad (9)$$

式中, P 为激光功率密度(W/cm^2), t 为激光脉冲宽度(s), λ 为激光波长(μm).

由式(9)可知,在波长一定、光纤端面光斑尺寸一样的情况下,光纤最大可输入激光能量与脉冲内激光峰值功率成反比,可算得脉冲内光纤端面承受绿光激光功率密度的上限为 $(1.22 \sim 12.21) \times 10^6 \text{ W}/\text{cm}^2$.假设输出光纤需要承受最大平均功率为 40 W、重复频率为 300 Hz 的激光,则单脉冲能量为 133 mJ,通常在调 Q 激光的脉宽都是纳秒量级,在相位匹配成功条件下腔内倍频可以获得较高的脉冲峰值功率,通常为兆瓦量级,此时如果聚光光斑太小,很容易达到光纤的损伤阈值,因此,为了将大能量激光耦合进光纤而不损伤光纤端面,需要展宽脉冲.设计的绿光激光脉宽需展宽到 70 μs ,算得激光脉冲内峰值功率小于 2 000 W,为了防止光纤端面损伤,激光聚焦光斑半径需大于 195 μm ,因此取传光光纤纤芯直径为 800 μm ,数值孔径为 0.22.

被动调 Q 的物理过程决定,在闪光灯高压放电的时间内,可以产生 1 个或者多个脉冲,产生脉冲个数的判定条件如式(7)所示.通过控制泵浦宽度以及泵浦功率可以产生设计需要的脉冲个数,从而达到展宽脉宽的目的.仿真表明如果需要一个泵浦周期内产生 4 个脉冲,那么泵浦时间设置范围是 700~875 μs ,到达工作物质的泵浦光功率范围是 851~1 012 W.可设置的泵浦宽度为 800 μs ,恰好满足产生 4 个子脉冲的时间条件.考虑到电光转换效率以及聚光效率,最大 5 kW 的泵浦源满足产生 4 个子脉冲的泵浦功率条件.

2 实验装置

根据第 1 节理论,研制的未含光纤耦合输出部分的激光器主体结构如图 6 所示.氙灯泵浦平凸腔,后腔镜对 1 064 nm 全反,曲率半径为 700 mm,输出镜对 1 064 nm 全反、532 nm 高透,谐波镜对 1 064 nm 高透、532 nm 全反.激光工作物质是 Nd:YAG 晶体,Nd³⁺ 掺杂浓度为 1.1 atm%,尺寸为 $\phi 6 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$,被动调 Q 晶体 Cr⁴⁺:YAG 长度为 10 mm,Cr⁴⁺ 掺杂浓度为 $3.762 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$,长度为 10 mm.KTP 晶体尺寸为 7 mm \times 7 mm \times 15 mm,II 类相位匹配,在 300 K 时,匹配角为 $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 23.5^\circ$,此时有效非线性系数最大^[12].KTP 晶体两端均镀 1 064 nm 和 532 nm 增透膜,并尽量靠近输出腔镜放置,以充分利用基频光的束腰来提高通过倍频晶体的基频光功率密度从而提高二次谐波的转换效率.实验中 KTP 晶体快轴方向和水平方向的夹角为 45°,以保证最大的谐波转换效率输出线偏振光,并以与激光晶体同样的方式进行冷却.输出镜后加一滤光片滤掉逸出腔外的基频光后经过耦合透镜组导入光纤输出.实验选用 COHERENT FieldMax II-To 激光功率计测量输出绿光功率,利用 Tektronic TDS1012 数字示波器测量激光脉冲宽度并记录脉冲波形.

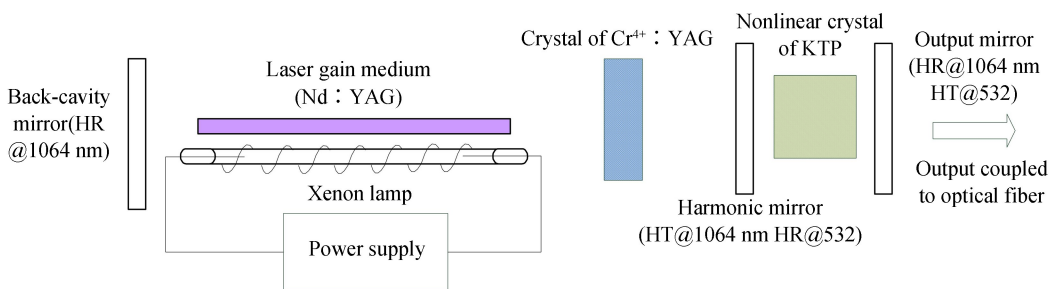


图6 绿光激光器实验装置示意图
Fig.6 Schematic diagram of green laser experimental device

3 实验结果

在一定的泵浦功率下,让研制的激光器先工作在低重频状态下输出稳定的绿光,然后逐渐提高重复频率,输出高功率的绿光.激光输出功率与重复频率之间的关系如图7所示.图7表明随着输出频率的增加,激光输出功率也增加.当重复频率低于250 Hz时,激光器输出功率与重复频率之间保持较好的线性关系,当重复频率高于250 Hz时,激光功率增长幅度小于重复频率增长幅度,分析是由于腔内元件热效应加剧,激光谐振腔工作于非稳腔状态,腔损耗增大造成的.当重频在300 Hz时,激光稳定工作输出最大平均功率为38 W.用两点法测量了激光的发散角,得到激光发散角约为3.5 mrad.

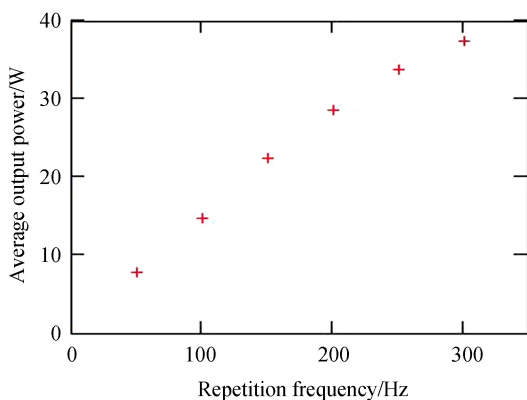
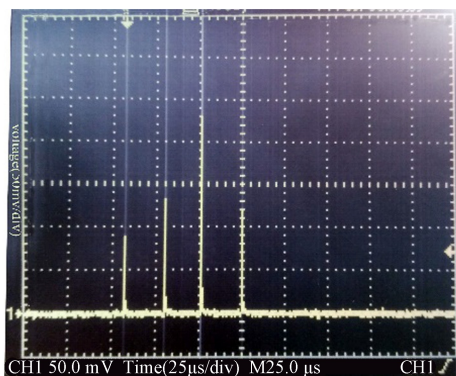
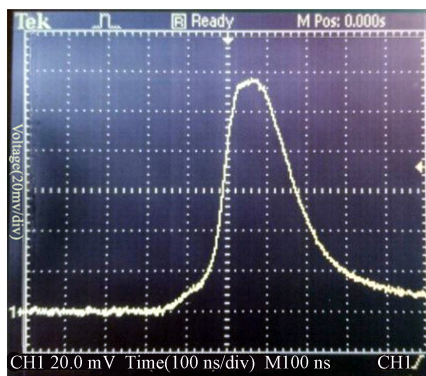


图7 绿光激光器输出功率与重复频率的关系
Fig.7 Relationship between output power and repetition rate of green Laser

在最大功率条件下,实际测量激光输出脉冲波形如图8所示.从图8(a)中可以看出,激光脉冲由子脉冲组成,子脉冲峰值不同是由于示波器采样抖动造成,实际峰值相差不大,整个脉冲宽度约为70 μs.从图8(b)中可以看出,子脉冲宽度约为180 ns.图8中存在多个子脉冲正好是被动调Q所具有的特性,它既满足了激光脉冲峰宽展宽的要求,也满足了激光照明脉冲峰值功率较高的要求.实验结果的脉宽与仿真结果相近,但峰值功率比仿真结果高,可能是仿真过程中闪光灯的谱线模型不够精细,造成吸收效率设置偏低.



(a) Pulse waveform



(b) Subpulse waveform

图8 绿光激光器输出波形
Fig.8 Output waveform of green laser

将倍频激光耦合进入1 m长的光纤中,测量光纤输出端激光功率为35 W,耦合效率达到92%.光纤输出激光束为一圆对称光斑,为了使某一特定区域照明光斑呈长椭圆形,可以让激光分别经过水平和垂直放置的柱透镜,实现对光束水平和垂直方向的变换.对通过光束变换后输出的绿光进行水下照明测试,照明面积为

1 m × 3.5 m (距离 2.2 m), 实验效果如图 9 所示.



图 9 光纤输出绿光水下照明效果

Fig.9 Picture of fiber output underwater illumination effect

经测试,在 300 Hz 脉冲泵浦时,激光脉冲延时设置为 175 μs ,相机快门延时设置为 160 μs ,快门宽度设置为 105 μs ,可满足高速相机水下拍摄同步照明的控制时序要求.

4 结论

本文研制了一台闪光灯泵浦、平凸非稳腔结构、KTP 晶体内腔倍频、被动调 Q 方式的绿光激光器,实现了最大重复频率为 300 Hz、脉冲宽度为 70 μs 、平均功率为 38 W、光束发散角为 3.5 mrad 的 532 nm 激光输出,并将该激光成功导入到芯径为 800 μm 的光纤中,耦合效率达到 92%.通过计算发现,该激光器总的电光效率为 0.76,能量利用率不高,因此采取更加有效的热管理措施,可进一步提高功率.

参考文献

- [1] LI Zhe, DENG Jia-hao, ZHOU Wei-ping. Technology of the underwater laser detection and its development[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2008, **28**(12): 8-11.
李哲,邓甲昊,周卫平.水下激光探测技术及其进展[J].舰船电子工程,2008,**28**(12):8-11.
- [2] GENG Ai-cong, YANG Xiao-dong, YANG Min-jiang. Progress of research on all-solid-state green laser[J]. *Laser Journal*, 2011, **31**(1): 25-27.
耿爱丛,杨晓冬,杨明江.全固态绿光激光器研究进展[J].激光杂志,2011,**31**(1): 25-27.
- [3] GUO Jian-yang, ZHANG Jian, GUO Liang, et al. Research on a pulse green laser[J]. *Applied Laser*, 2013, **33**(1): 58-62.
郭建洋,张健,郭亮,等.脉冲绿光激光器的研究[J].应用激光,2013,**33**(1):58-62.
- [4] LI Xin-rong, SUN Qi. Green laser with high energy, narrow pulse width and high average power[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(11): 122-125.
李欣荣,孙琦.大能量窄脉宽高平均功率绿光激光器[J].激光与光电子学进展,2011,**48**(11): 122-125.
- [5] GENG Ai-cong, BO Yong, BI Yong, et al. High beam quality green generation with output 140 W based on a thermally near-unstable flat-flat resonator[J]. *Chinese Physics Letters*, 2005, **22**(1): 125-127.
- [6] LIU Xue-sheng, XIA Jiao-zhen, YAN Xin, et al. 63 W green laser based on an intracavity-frequency-doubled lamp-pumped acousto-optic q-switched Nd: YAG laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36**(1): 15-18.
刘学胜,夏皎贞,鄢歆,等.63W灯抽运声光调Q腔内KTP倍频Nd:YAG激光器[J].中国激光,2009,**36**(1):15-18.
- [7] WANG Rong-bo, ZHONG Sen-cheng, LI Ze-ren, et al. Development of underwater range-gated imaging system based on laser illumination[J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2013, **25**(7): 1666-1670.
王荣波,钟森城,李泽仁,等.激光照明水下目标距离选通成像系统的研制[J].强激光与粒子束,2013,**25**(7):1666-1670.
- [8] NIE Jin-song. Research on optimization techniques of lamp pumped high-energy solid-state laser[J]. *Journal of China University of Metrology*, 2016, **27**(3): 247-253.
聂劲松.灯泵高能固体激光器优化技术研究[J].中国计量大学学报,2016,**27**(3):247-253.
- [9] WANG Lei, NIE Jin-song, 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.
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.
- [10] MALEKI A, DINDARLU M H M, SAGHAFIFAR H, et al. 57 mJ with 10 ns passively Q-switched diode pumped Nd: YAG laser using Cr⁴⁺: YAG crystal[J]. *Optical & Quantum Electronics*, 2016, **48**(1): 48.
- [11] LING Ming-wei, SHEN Xue-ju, LI Xiao-ming. Experiment research of frequency doubling characteristics in tandem

- double KTiOPO₄ crystal[J]. *Laser Technology*, 2012, **36**(6): 802-805.
- 兰明伟,沈学举,李晓明.双磷酸氧钛钾晶体倍频特性的实验研究[J].*激光技术*,2012,**36**(6):802-805.
- [12] CHEN Hao-wei, CHEN Xiu-yan, LI Xiu, *et al.* High average power Q-switched green beam generation by intracavity frequency doubling of diode-side-pumped Nd : YAG/HGTR-KTP laser[J]. *Optics and Laser Technology*, 2009, **41**(1): 1-4.
- [13] WANG Yu-ye, XU De-gang, XIONG Jing-ping, *et al.* Numerical Modelling of QCW-Pumped Passively Q-Switched Nd : YAG Lasers with Cr³⁺ : YAG as Saturable Absorber[J]. *Chinese Physics Letters*, 2008, **25**(8): 2880-2883.
- [14] XIONG Jing-pin, LI Jia-qiang, AN Zheng-jie, *et al.* 310 W all-solid-state quasi-continuous-wave Nd : YAG green laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(6):141-144.
熊景平, 李嘉强, 安振杰,等. 310W 全固态准连续 Nd : YAG 绿光激光器[J]. *光学学报*, 2013, **33**(6):141-144.
- [15] YAO Jian-quan , XU De-gang. All-solid-state laser and nonlinear optical frequency transformation[M]. Beijing: Science Press, 2007: 655-657.
姚建铨,徐德刚.全固态激光及非线性光学频率变换[M].北京:科学出版社,2007:655-657.
- [16] CHENG Bo, GUO Ning, WU Li-zhi, *et al.* Damage characteristics of silica fibers and hollow fibers[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(12): 1221002.
成波,郭宁,吴立志,等.石英光纤与空芯光纤损伤特性研究[J].*红外与激光工程*, 2016, **45**(12):1221002.

Foundation item: State Key Laboratory Director Foundation of Pulsed Power Laser Technology (No.SK12015ZR01)

引用格式: YE Qing, FAN Yi-song, BIAN Jin-tian, *et al.* Development of a Green Laser Pumped by Flash Lamp Applicable to Underwater Synchronous Lightening[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(1): 1114004

叶庆,范一松,卞进田,等.适用于水下同步照明的灯泵浦绿光激光器研制[J].*光子学报*,2019,**48**(1):1114004