

引用格式: MENG Peibei, QI Ming, RONG Wei, et al. Wavelength Tuning Characteristics of Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG Laser Based on Volume Bragg Grating[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(5):0514005

蒙裴贝, 齐明, 荣微, 等. 基于体布拉格光栅的 Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG 激光器波长调谐特性[J]. 光子学报, 2021, 50(5):0514005

基于体布拉格光栅的 Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG 激光器波长调谐特性

蒙裴贝, 齐明, 荣微, 李梦龙, 王春辉, 陶宇亮

(北京空间机电研究所 中国空间技术研究院空间激光信息感知技术核心专业实验室, 北京 100094)

摘 要:通过建立包含体布拉格光栅波长特性的速率方程模型,模拟了不同泵浦功率、体布拉格光栅中心衍射效率和带宽情况下,激光器的波长调谐特性,包括波长调谐范围、激光光谱、能量和脉冲宽度。实验搭建了以体布拉格光栅作为输出镜的激光二极管泵浦 Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG 激光器,测试了不同体布拉格光栅温度和泵浦功率时的激光波长、线宽、能量和脉冲宽度,实验结果和理论分析结果基本相符。在重复频率为 10 kHz,脉冲宽度为 40 μ s,峰值功率为 10.7 W 的矩形脉冲泵浦下,通过调整中心衍射效率为 70%,带宽为 60 pm 的体布拉格光栅温度,获得了 1 063.77~1 064.48 nm 的波长调谐。当体布拉格光栅为 50 $^{\circ}$ C 时,获得了单脉冲能量为 109.5 μ J,脉冲宽度为 1.71 ns,中心波长为 1 064.432 nm,线宽为 38.3 pm,光束质量 M^2 因子小于 1.2 的激光输出。研究结果可为体布拉格光栅的应用、激光器的光谱分析及设计提供参考。

关键词: 固体激光器; 二极管泵浦; 可调谐; Nd:YAG; Cr⁴⁺:YAG; 体布拉格光栅

中图分类号: TN248

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215005.0514005

Wavelength Tuning Characteristics of Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG Laser Based on Volume Bragg Grating

MENG Peibei, QI Ming, RONG Wei, LI Menglong, WANG Chunhui, TAO Yuliang

(Key Laboratory for Space Laser Information Perception Technology of CAST,
Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: In theory, the tuning characteristics including tunable range, spectrum, energy and pulse width were simulated under different pump power, volume Bragg grating central diffraction efficiencies and spectral widths by setting up a rating equation model including volume Bragg grating wavelength property. A laser diode pumped Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG laser with a volume Bragg grating as output coupler was set up. The laser wavelength, linewidth, energy and pulse width were measured at different volume Bragg grating temperatures and pump power. The experimental results and theoretical results are in agreement. At the repetition rate of 10 kHz, pump pulse width of 40 μ s, pump peak power of 10.7 W, tunable range from 1 063.77 to 1 064.48 nm is obtained. When the volume Bragg grating temperature is 50 $^{\circ}$ C, output energy of 109.5 μ J, pulse width of 1.71 ns, wavelength of 1 064.432 nm, linewidth of 38.3 pm, M^2 factor of less than 1.2 is achieved. The investigating results can be a reference of volume Bragg grating application, spectral analysis and design of laser.

Key words: Solid-state; Diode pumped; Tunable; Nd:YAG; Cr⁴⁺:YAG; Volume Bragg grating

OCIS Codes: 140.3580; 140.3480; 140.3600; 140.3540

基金项目: 装备预研航天科技联合基金(No. 6141B060305)

第一作者(通讯作者): 蒙裴贝(1987—), 女, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为空间应用激光器技术。Email: pbmeng@163.com

收稿日期: 2020-11-25; 录用日期: 2021-01-18

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

0 引言

高重复频率、高峰值功率、窄脉冲宽度、窄线宽、波长调谐激光在光子计数激光雷达领域具有广泛的应用^[1-3]。高重复频率可以提高测量效率,高峰值功率有利于远距离探测,窄脉冲宽度有利于提高探测精度,窄线宽有利于光学滤波,减少背景噪声,波长调谐有利于激光波长与光学滤波器匹配,提高滤波效率。激光二极管(Laser Diode, LD)泵浦Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG激光器具有体积小、结构简单等优点,是实现高重复频率和高峰值功率输出的有效手段^[4-6]。相对结构复杂的环形腔法、标准具法及双折射滤光片法,体布拉格光栅(Volume Bragg Grating, VBG)激光损伤阈值高,结构简单,能够有效实现线宽压缩和波长调谐^[7-10]。因此,基于VBG波长调谐的高重复LD泵浦Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG激光器可以作为光子计数激光雷达激光源。实验方面,2010年,PAVAL N等报道了以VBG为输出镜的LD泵浦Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG激光器,通过改变VBG和Nd:YAG温度,实现了0.7 nm的波长调谐,激光重复频率为10 Hz,能量为mJ量级,脉冲宽度为3~4 ns,线宽小于100 pm^[7]。2012年,任德明等报道了以VBG为输出镜的闪光灯泵浦Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG的单纵模激光器,重复频率为1 Hz,能量为20.8 mJ,脉冲宽度为13.2 ns^[8]。VBG在高重复频率激光器的应用报道较少。理论方面,报道主要集中于基于被动调Q速率方程模型的激光器能量和脉冲宽度计算^[11-13]和VBG的设计仿真^[14],鲜有关于VBG应用于激光器的能量、光谱等性能仿真的研究。

本文通过建立考虑VBG波长特性的准连续LD泵浦Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG激光器速率方程模型,模拟仿真了激光器波长调谐特性,并进行了实验验证。

1 实验装置

实验装置如图1(a)所示。泵浦源是中心波长为808 nm的光纤耦合LD,光纤芯径为100 μm ,数值孔径为0.12。LD工作在矩形脉冲模式下,重复频率为10 kHz,脉冲宽度为40 μs 。光纤耦合输出的808 nm泵浦光通过两个耦合透镜整形。采用CCD测量激光介质内聚焦的泵浦光斑半径,约为185 μm 。激光晶体为3 mm \times 3 mm \times 5 mm的Nd:YAG晶体。Nd:YAG掺杂浓度为1.1 at.%,泵浦面镀激光波长1064 nm高反膜(反射率 $R > 99.9\%$)和泵浦波长808 nm增透膜(反射率 $R < 0.1\%$)。另一面镀激光波长和泵浦波长的增透膜($R < 0.1\%$)。激光晶体包裹在铜箔中,并由紫铜热沉固定,紫铜热沉的温度由热电制冷器控制在25 $^{\circ}\text{C}$ 。饱和吸收体Cr⁴⁺:YAG初始透过率为68.13%,长度为1.95 mm。Cr⁴⁺:YAG的两个端面镀1064 nm增透膜($R < 0.1\%$)。反射式VBG作为输出镜。VBG中心波长为1064.18 nm@25 $^{\circ}\text{C}$,中心衍射效率为70%,带宽为60 pm,尺寸为5 mm \times 5 mm \times 12.3 mm,两个端面镀1064 nm增透膜($R < 0.1\%$),倾斜角度小于1.5 $^{\circ}$,反射率曲线如图1(b)所示。VBG由铜箔包裹后安装在紫铜热沉中,热沉温度由另一片热电制冷器控制。不考虑Nd:YAG、Cr⁴⁺:YAG和VBG长度,剩余的谐振腔长约为1 mm。

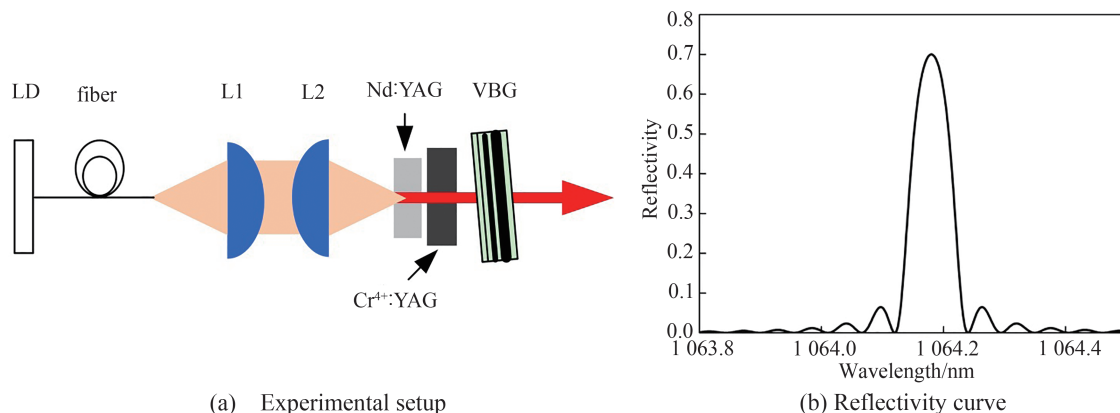


图1 实验装置及反射率曲线

Fig. 1 Experimental setup and reflectivity curve

2 仿真模型的建立

2.1 VBG 波长特性

不考虑VBG的角度特性,反射式VBG的衍射效率 η 可以表示为^[14]

$$\eta = \left\{ 1 + \frac{1 - \left[\frac{\lambda_0 f_v^2 (\lambda_1 - \lambda_0)^2}{2n_v \delta_v} \right]^2}{\sinh^2 \sqrt{\left(\frac{2\pi n_v t_v \delta_v}{\lambda_0^2 f_v} \right)^2 - \left[\frac{\pi f_v t_v (\lambda_1 - \lambda_0)}{\lambda_0} \right]^2}} \right\}^{-1} \quad (1)$$

$$\lambda_0 = \frac{2n_v \cos \theta}{f_v} \quad (2)$$

式中, λ_0 为VBG的中心波长, λ_1 为激光波长; f_v 为VBG的空间频率, n_v 为VBG的折射率; δ_v 为VBG的折射率调制参数, t_v 为VBG的厚度, θ 为入射布拉格角。中心波长 λ_0 对应的衍射效率,即中心衍射效率 η_0 满足

$$\eta_0 = \tanh^2 \left(\frac{2\pi n_v t_v \delta_v}{\lambda_0^2 f_v} \right) \quad (3)$$

衍射效率的带宽 δ_λ 满足

$$\delta_\lambda = \frac{\lambda_0 \sqrt{(\arctan h \sqrt{\eta_0})^2 + \pi^2}}{\pi f_v t_v} \quad (4)$$

VBG的等效光学长度 l_{VBG} 满足^[15]

$$l_{\text{VBG}} = \frac{\sqrt{\eta_0}}{2 \arctan h \sqrt{\eta_0}} t_v \quad (5)$$

2.2 速率方程

以VBG作为输出镜,不考虑下能级粒子数,1064 nm Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG激光器的四能级速率方程为^[13]

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{\Phi}{t_r} \left[2\sigma_{\text{em}} N l_c - 2\sigma_g N_g l_s - 2\sigma_e N_e l_s - \ln \left(\frac{1}{\eta} \right) - \delta_c \right] + \kappa \frac{N}{\tau_f} \quad (6)$$

$$\frac{dN}{dt} = -\gamma c \sigma_{\text{em}} \Phi N - \frac{N}{\tau_f} + \frac{\eta_s \eta_a \eta_Q \eta_B P_p}{\pi \omega_p^2 l_c h \nu_1} \quad (7)$$

$$\frac{dN_g}{dt} = -c \sigma_g \Phi N_g + \frac{N_{s0} - N_g}{\tau_s} \quad (8)$$

式中, Φ 为腔内光子数密度; N 为上能级粒子数密度; l_c 为Nd:YAG的长度; σ_{em} 为Nd:YAG的受激发射截面; τ_f 为Nd:YAG的上能级寿命; σ_g 为Cr⁴⁺:YAG的基态吸收截面; σ_e 为Cr⁴⁺:YAG的激发态吸收截面; τ_s 为Cr⁴⁺:YAG的上能级寿命; l_s 为Cr⁴⁺:YAG的长度; N_g 为Cr⁴⁺:YAG的基态粒子数密度; N_e 为Cr⁴⁺:YAG的激发态粒子数密度,满足 $N_e = N_{s0} - N_g$; N_{s0} 为Cr⁴⁺:YAG的粒子数密度,满足

$$N_{s0} = \frac{-\ln(T_0)}{\sigma_g l_s} \quad (9)$$

T_0 为Cr⁴⁺:YAG的小信号透过率; δ_c 为谐振腔损耗; κ 为自发发射耦合进入激光模式的效率; γ 为简并因子; c 为光速; η_s 为斯托克斯因子,满足 $\eta_s = \lambda_p / \lambda$; λ_p 为泵浦光波长; η_a 和 η_Q 分别为Nd:YAG对泵浦光的吸收效率和量子效率; η_B 为光束匹配效率; ω_p 为泵浦光斑半径; h 为普朗克常量; ν_1 为激光频率,满足 $\nu_1 = c / \lambda$; t_r 为光子往返时间,满足

$$t_r = \frac{2L}{c} = \frac{2(n_c l_c + n_s l_s + l_{\text{VBG}} + \Delta l)}{c} \quad (10)$$

式中, L 为谐振腔光学长度, n_c 为Nd:YAG的折射率; n_s 为Cr⁴⁺:YAG的折射率; Δl 为除Nd:YAG、Cr⁴⁺:YAG和VBG外的剩余谐振腔长度; P_p 为泵浦功率。假设泵浦光为矩形脉冲,脉冲重复频率为 f ,脉冲宽度为 τ_p ,峰值功率为 P_{p0} ,则一个周期内 P_p 满足

$$P_p(t) = \begin{cases} P_{p0}, & 0 \leq t \leq \tau_p \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (11)$$

激光器输出脉冲功率 $P(t)$ 和能量 E 满足

$$P(t) = \frac{hv_1 AL \ln(1/\eta)}{t_r} \Phi(t) \quad (12)$$

$$E = \int_0^\infty P(t) dt \quad (13)$$

式中, A 为激光束截面。假设腔内激光半径 ω_1 变化很小, ω_1 为常数, A 满足 $A = \pi\omega_1^2$ 。根据 $P(t)$ 可以得到激光脉冲宽度(峰值半高全宽, 简称 FWHM) τ_1 。

2.3 激光特性的计算方法

基于 Nd:YAG 的发射截面^[14]和 VBG 的衍射效率, 波长离散后, 将速率方程离散得到差分方程组, 采用迭代法求解得到每个波长 λ_{li} ($i=1, 2, \dots, n$) 对应的能量 $E(\lambda_{li})$ 。基于 $E(\lambda_{li})$ 得到 λ_{li} 在光谱中的权重 $\Delta(\lambda_{li})$, 从而得到光谱曲线。根据光谱曲线可以计算激光波长 λ_1 和线宽(FWHM)。 λ_1 满足

$$\lambda_1 = \sum_{i=1}^n \lambda_{li} \Delta(\lambda_{li}) \quad (14)$$

等效发射截面 $\overline{\sigma_{em}}$ 满足

$$\overline{\sigma_{em}} = \sum_{i=1}^n \sigma_{em}(\lambda_{li}) \Delta(\lambda_{li}) \quad (15)$$

以 $\overline{\sigma_{em}}$ 计算激光能量和脉冲宽度。仿真的参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数
Table 1 Parameters for simulating

Parameter	Value	Reference
Plank constant (h)	$6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$	
Velocity of light (c)	$3 \times 10^8 \text{ m/s}$	
Pump wavelength (λ_p)	808 nm	
Pump beam radius (ω_p)	0.185 mm	
Pump frequency (f_p)	10 000 Hz	
Pump duration (τ_p)	40 μs	
Upper level lifetime of Nd:YAG (τ_l)	230 μs	
Refractive index of Nd:YAG (n_c)	1.82	
Length of Nd:YAG (l_c)	5 mm	
Degeneracy factor (γ)	1	
Coupling efficiency of spontaneous emission into lasing mode (κ)	1×10^{-50}	
Absorption efficiency (η_a)	0.78(measured)	
Pump quantum efficiency (η_q)	0.95	[16]
Beam match efficiency (η_b)	0.95	[16]
Initial transmission of Cr ⁴⁺ :YAG (T_0)	0.68	
Length of Cr ⁴⁺ :YAG (l_s)	1.95 mm	
Cr ⁴⁺ :YAG absorption cross section of simulated state (σ_e)	$2.2 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$	[16]
Cr ⁴⁺ :YAG absorption cross section of ground state (σ_g)	$8.7 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$	[16]
Cr ⁴⁺ :YAG simulated state lifetime (τ_s)	3 μs	
Refractive index of Cr ⁴⁺ :YAG (n_s)	1.82	
Other cavity length (Δl)	1 mm	
Cavity loss (δ_c)	0.01	
Beam radius (ω_1)	0.15 mm	
Refractive index of VBG@25°C (n_v)	1.486 7	[17]
VBG spatial frequency (f_v)	$0.001 5 \text{ nm}^{-1}$	[18]
VBG central wavelength@25°C (λ_0)	1 064.18 nm	
VBG central diffractive efficiency (η_0)	70%	
VBG diffractive efficiency spectral width (δ_λ)	60 pm	

3 输出特性的数值模拟

3.1 波长调谐仿真分析

由式(2)可知,通过调整 VBG 的温度,可以改变 VBG 折射率^[19],从而调整 VBG 中心波长,VBG 中心波长随 VBG 温度的变化关系为 7 pm/°C。根据 VBG 的 λ_0 、 η_0 和 δ_λ ,可以计算得到 t_V 和 δ_V 。对于 λ_0 为 1 064.18 nm@25°C, η_0 为 70% 和 δ_λ 为 60 pm 的 VBG, t_V 为 12.26 mm, δ_V 为 1.855×10^{-5} 。VBG 温度对 η_0 和 δ_λ 的影响如图 2 所示。温度变化 200°C, η_0 变化 0.000 8, δ_λ 变化 0.01 pm, 变化很小,对激光器的影响可以忽略。

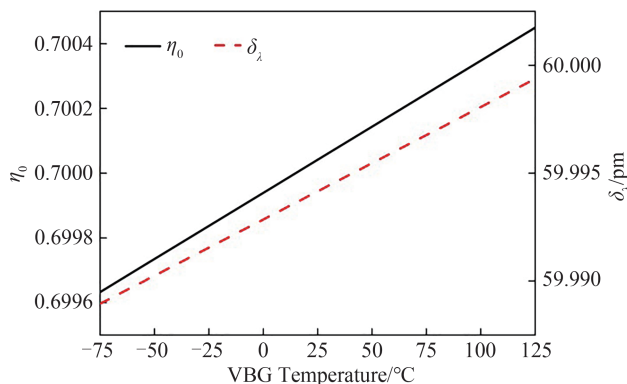


图2 VBG 温度对 η_0 和 δ_λ 的影响
Fig. 2 Influence of VBG temperature on η_0 and δ_λ

一定泵浦功率下,波长对应的发射截面过小,则一个泵浦周期内不能形成振荡,发射截面过大,则一个泵浦周期会出现双激光脉冲,因此只能在一定发射截面范围,即一定波长范围内实现单脉冲激光输出。泵浦脉冲宽度 τ_p 为 40 μ s 时,不同峰值泵浦功率 P_{p0} 下的波长调谐范围如表 2 所示。

表 2 波长调谐范围 ($\tau_p=40 \mu$ s)
Table 2 Wavelength tunable range ($\tau_p=40 \mu$ s)

η_0	δ_λ /pm	P_{p0} /W	Wavelength tunable range/nm
70%	60	10.7	1 063.77~1 064.48
70%	60	9.5	1 063.81~1 064.29
70%	60	8.5	1 063.97~1 064.25
70%	60	7.5	1 064.10~1 064.23
65%	60	7.5	1 064.12~1 064.19
80%	60	7.5	1 063.98~1 064.26
70%	20	7.5	1 064.09~1 064.22
70%	100	7.5	1 064.09~1 064.24

由表 2 可以看出, P_{p0} 越大,调谐范围越宽。当 P_{p0} 为 10.7 W 时,波长调谐范围为 1 063.77~1 064.48 nm。VBG 温度-波长调谐曲线如图 3 所示。激光波长随 VBG 温度变化系数为 7 pm/°C,与 VBG 中心波长随温度变化系数近似。同时仿真分析发现,VBG 中心波长与激光波长近似。

不同激光波长下的光谱和线宽如图 4 和图 5 所示。由于 Nd:YAG 的发射峰位于 1 064.15 nm,因此激光波长为 1 064.15 nm,即 VBG 中心波长为 1 064.15 nm 时,能够起振的波长最多,线宽较宽,约为 80 pm;随着激光波长和 VBG 中心波长偏离 1 064.15 nm,能够起振的波

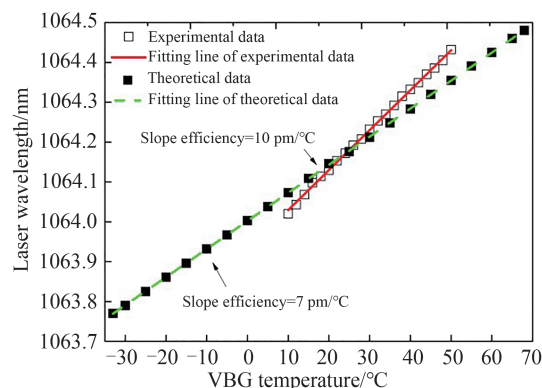


图3 VBG 温度-波长调谐曲线
Fig.3 VBG temperature-wavelength tuning curve

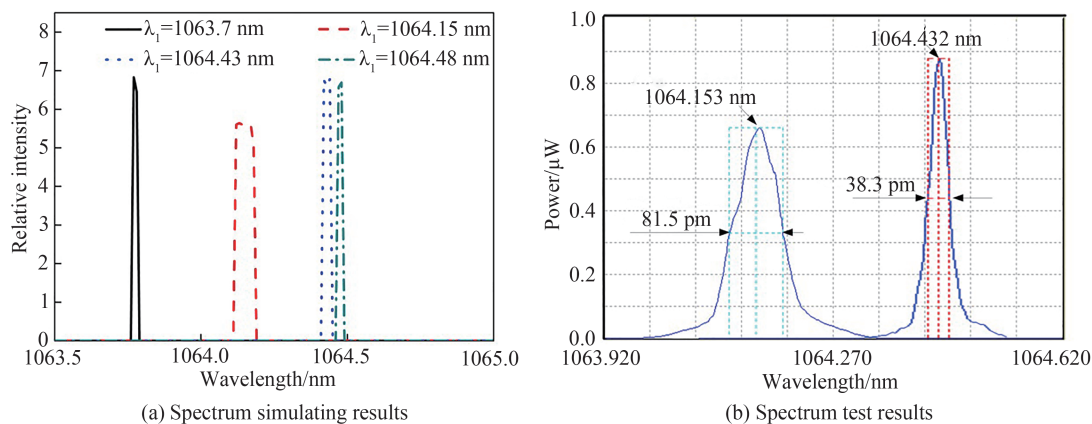


图4 光谱仿真与光谱测试结果
Fig. 4 Spectrum simulating and spectrum test results

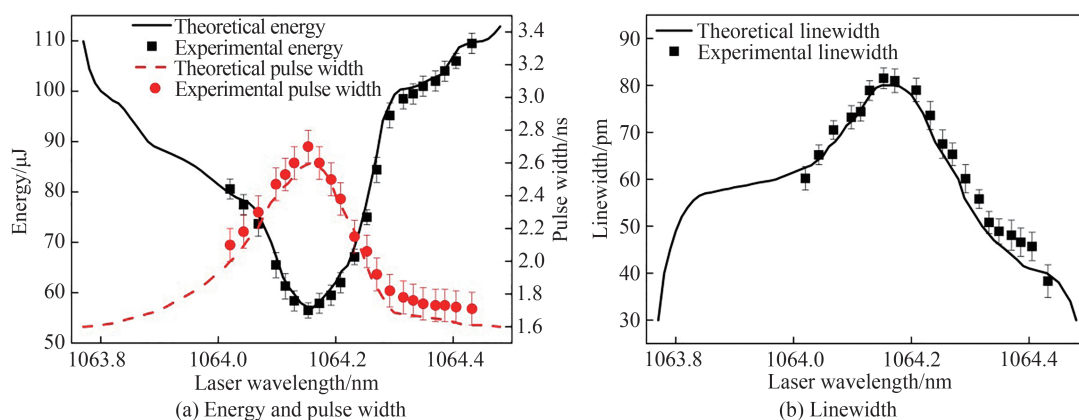


图5 激光波长与性能的关系
Fig.5 Relationship between laser wavelength and performance

长减少,因此线宽变小,激光波长为1 063.77 nm和1 064.48 nm时,线宽为30 pm。

激光波长与能量及脉冲宽度的关系如图5所示。1 064.15 nm对应的等效发射截面最大,因此激光波长为1 064.15 nm对应的能量(57.3 μJ)最小,脉冲宽度(2.6 ns)最大,随着激光波长偏离1 064.15 nm,等效发射截面减小,能量增大,脉冲宽度减小。1 063.77~1 064.48 nm调谐范围内,能量范围为57.3~112.9 μJ,脉冲宽度范围为1.6~2.6 ns。

激光波长为1 064.15 nm,峰值泵浦功率 P_{p0} 为10.7 W,泵浦脉冲宽度 τ_p 为40 μs时,一个泵浦周期内的脉冲轮廓及脉冲建立时刻如图6所示。以泵浦光脉冲上升沿为零时刻,激光脉冲建立时刻约为24.96 μs,脉冲宽度为2.6 ns。

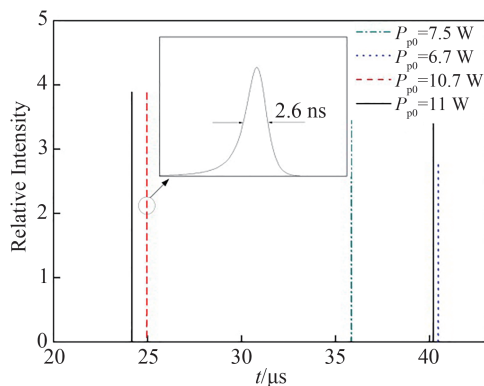


图6 脉冲轮廓及脉冲建立时刻
Fig.6 Pulse trace and pulse set-up time

3.2 泵浦功率的影响分析

τ_p 为40 μ s时,1 064.15 nm激光能够以10 kHz重复频率单脉冲稳定运转的 P_{p0} 范围为6.7 W~10.9 W,当 P_{p0} 小于6.7 W时,一个周期内无激光脉冲,当 P_{p0} 大于10.9 W时,一个泵浦周期内出现双脉冲现象,如图6所示。同时随着泵浦功率增大,脉冲形成时间提前。泵浦功率对能量、脉冲宽度、激光波长和线宽的影响如图7所示。 P_{p0} 由6.7 W增大到10.7 W,能量由51.1 μ J增大到57.3 μ J,脉冲宽度由3.2 ns下降到2.6 ns,激光波长稳定,在1 064.15 nm \pm 0.005 nm范围内,线宽变化明显,由20 pm变化至80 pm。线宽增大的原因为 P_{p0} 增大,能够起振的波长增多。

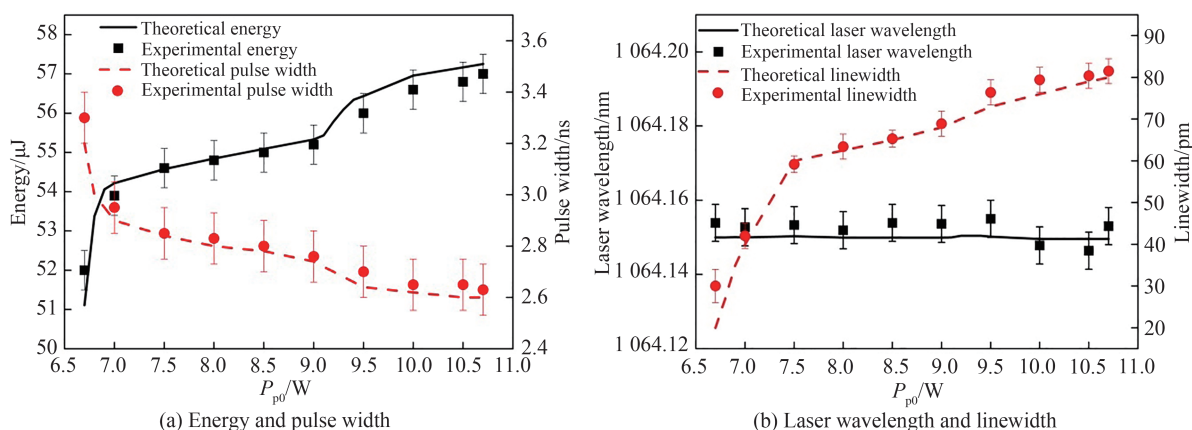


图7 泵浦功率与性能的关系

Fig.7 Relationship between pump power and performance

3.3 VBG 中心衍射效率和带宽的影响分析

对于中心波长为1 064.15 nm的VBG,中心衍射效率 η_0 及带宽 δ_λ 和厚度 t_v 的关系如图8所示。 t_v 越大, η_0 越大, δ_λ 越小。 η_0 为0.7时, t_v 由7.36 mm增大至36.78 mm,则 δ_λ 由100 pm减小至20 pm。 δ_λ 为60 pm时, t_v 由11.57 mm增大至12.59 mm, η_0 由0.2增大至0.8。

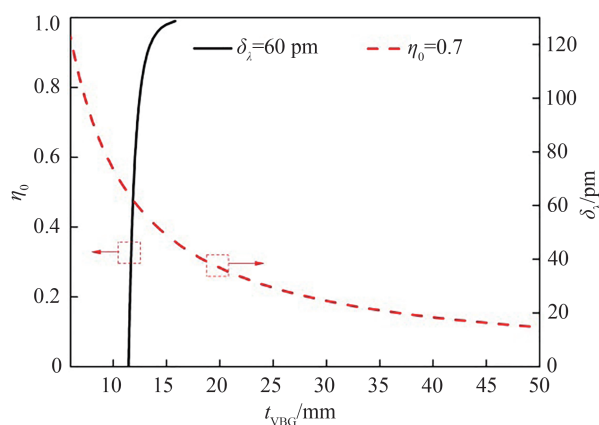


图8 VBG的 η_0 及 δ_λ 和 t_v 的关系

Fig. 8 η_0 and δ_λ of VBG versus t_v

当 P_{p0} 为7.5 W, τ_p 为40 μ s时, η_0 及 δ_λ 对波长调谐范围的影响如表2所示。与 δ_λ 相比, η_0 对波长调谐范围的影响较大。 η_0 越大,波长调谐范围越大, η_0 由65%增大到80%时,调谐范围由1 064.12~1 064.19 nm增大到1 063.98~1 064.26 nm。 η_0 及 δ_λ 对能量、脉冲宽度和线宽的影响如图9所示。相同激光波长下, η_0 越大,能量越小,脉冲宽度越窄,线宽越宽。相同中心波长下, δ_λ 越小,线宽越小,能量越大,但脉冲宽度越宽,主要原因在于VBG厚度增大。当 δ_λ 为100 pm时,最大的线宽只有70 pm,主要原因为当前增益下,更多的波长不足以起振。

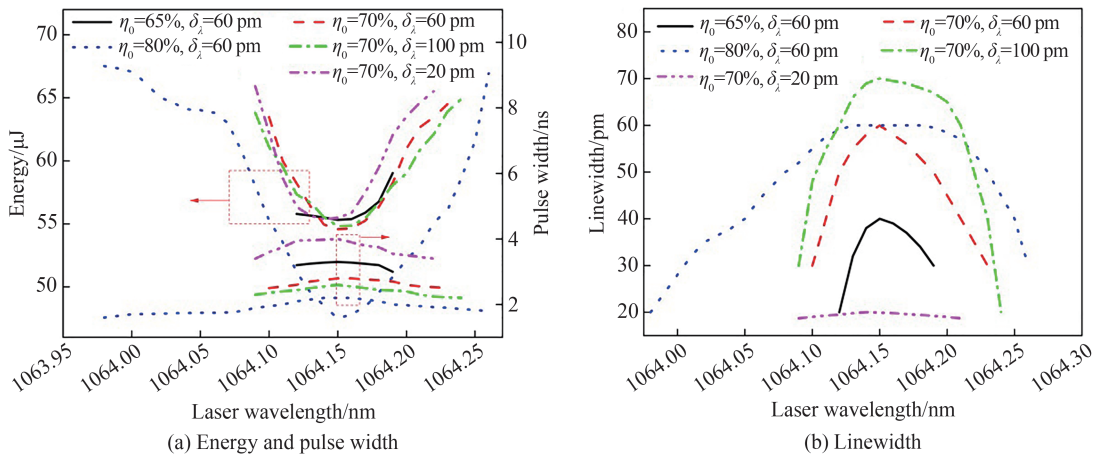


图9 η_0 及 δ_λ 对激光性能的影响
Fig. 9 Influence of η_0 and δ_λ on laser performance

4 实验结果与讨论

采用YOKOGAWA公司的AQ 6370D光谱仪(分辨率0.02 nm)测试激光波长。当 P_{p0} 为10.7 W, τ_p 为40 μs 时, VBG温度与激光中心波长关系如图3所示。VBG由10 $^\circ\text{C}$ 变化到50 $^\circ\text{C}$ 时,激光器实现1 064.020 nm到1 064.432 nm的调谐,波长-温度系数为10 pm/ $^\circ\text{C}$,和理论分析结果(7 pm/ $^\circ\text{C}$)接近,差异的原因主要包括三方面,首先实验中采用VBG折射率和折射率温度系数与仿真中的参数存在一定差异,其次,用于VBG控温的热敏电阻位于热沉,激光器工作时,激光作用VBG上,会产生一定热量,从而热沉与VBG有一定的温度差,最后,激光器工作时,激光作用VBG上,有一定热量,VBG径向存在温度梯度。VBG为22 $^\circ\text{C}$ 和50 $^\circ\text{C}$ 时,光谱如图4所示。VBG为22 $^\circ\text{C}$ 时,激光波长为1 064.153 nm,线宽为81.5 pm,与仿真分析的线宽(80 pm)接近。VBG为50 $^\circ\text{C}$ 时,激光波长为1 064.432 nm,线宽为38.3 pm,与仿真分析得到的线宽(40 pm)接近。不同中心波长下的线宽如图5所示。随着中心波长偏离1 064.15 nm,线宽逐渐减小,和仿真结果趋势相同,但是由于仿真计算中波长分辨率为10 pm,并且没有进行匀化拟合处理,因此与实验结果有一定偏差,但是在10 pm的误差范围内。

采用功率计(探头型号:Thorlabs S145C)测量激光平均功率,并结合激光脉冲重复频率实现对激光能量的测量。采用高速光电探测器(型号:Thorlabs DET025A,上升时间150 ps)和示波器(型号:TektronixDPO7254C)测试脉冲宽度。不同激光波长对应的能量和脉冲宽度如图5所示。可以看出,实验结果和仿真结果基本一致。中心波长为1 064.15 nm时,等效发射截面最大,能量最小,为56.5 μJ ,脉冲宽度最大,为2.7 ns。随着温度升高或降低,激光波长偏离1 064.15 nm,等效发射截面减小,能量增大。VBG为50 $^\circ\text{C}$,即中心波长为1 064.432 nm时,能量最大,为109.5 μJ ,脉冲宽度最窄,为1.71 ns,如图10所示,对应峰值功率64 kW,光光转换效率25.6%。采用对Spiricon M2-200S光束质量分析仪测试光束质量,结果如图10所示。 X 方向和 Y 方向的 M^2 因子分别为1.18和1.16。

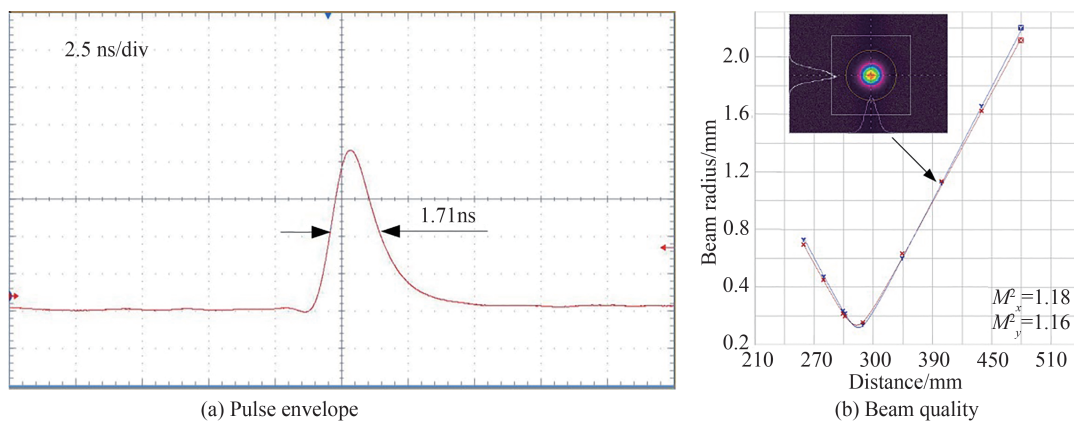


图10 激光性能
Fig. 10 Laser performance

当VBG温度控制为22℃,即中心波长为1 064.15 nm时,测试了不同峰值泵浦功率 P_{p0} 下的激光波长、线宽、能量和脉冲宽度,结果如图7所示。可以看出,实验结果和仿真结果相近,泵浦功率由6.7 W增大到10.7 W,能量由52 μJ增大到57 μJ,脉冲宽度由3.3 ns下降到2.63 ns,激光波长稳定,在1 064.15 nm±0.005 nm范围内,线宽变化明显,线宽由30 pm增大到81.5 pm。

5 结论

本文对基于VBG的高重频LD泵浦Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG激光器波长调谐特性进行了理论和实验研究。首先建立了包含VBG波长特性的准连续LD泵浦Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG激光器速率方程模型,采用波长离散和有限差分求解方法,获得了激光器输出光谱、能量和脉冲宽度的数值解,分析了不同泵浦功率、VBG中心衍射效率和带宽下,激光器的调谐特性,包括波长调谐范围、光谱、能量和脉冲宽度,为激光器的设计提供了依据。然后实验搭建了以VBG为输出镜的LD泵浦Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG激光器,测试了不同VBG温度和泵浦功率下的激光波长、线宽、能量和脉冲宽度,实验结果和理论分析结果基本相符,说明激光模型的正确性。理论上,在重复频率为10 kHz,脉冲宽度为40 μs,峰值功率为10.7 W的矩形脉冲泵浦下,通过调整VBG温度,由-33~68℃,可以实现1 063.77~1 064.48 nm的波长调谐。实验中,通过调整VBG温度,由10~50℃,获得了1 064.020~1 064.432 nm的波长调谐以及小于85 pm的线宽输出,激光波长和VBG温度关系为10 pm/℃,波长调谐过程中,能量变化范围为56.5~109.5 μJ,脉冲宽度变化范围为2.7~1.71 ns。VBG温度为50℃时,获得了能量为109.5 μJ,脉冲宽度为1.71 ns,中心波长为1 064.432 nm,线宽为38.3 pm的激光输出,对应峰值功率为64 kW,光-光转换效率25.6%,光束质量 M^2 因子小于1.2。研究结果可为VBG的应用、激光器的光谱分析及设计提供参考。在理论计算中,可进一步研究以下问题:仿真计算时,激光波长离散分辨率为10 pm,要更精确地计算,需采用插值或拟合的数据处理方法进一步提高分辨率;另一方面,根据应用需要,可以采用能量放大器对激光能量进一步放大。

参考文献

- [1] SAWRUK N W, BURNS P M, EDWARDS R E, et al. ICESat-2 laser Nd:YVO₄ amplifier[C]. SPIE, 2018: 10513.
- [2] LUO Yuan, HE Yan, GENG Liming, et al. Long-distance laser ranging lidar based on photon counting technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 0514001.
罗远,贺岩,耿立明,等.基于光子计数技术的远程测距激光雷达[J].中国激光,2016,43(5):0514001.
- [3] WANG Haiwei, DING Yuxing, HUANG Genghua, et al. Research on the long-range and compact photon counting lidar system under sunlight condition [J]. Infrared & Laser Engineering, 2019, 48(1): 0106005.
王海伟,丁宇星,黄庚华,等.轻小型全天时远程光子计数激光雷达系统技术[J].红外与激光工程,2019,48(1):0106005.
- [4] DAI Qin, CUI Jianfeng, MAO Youming, et al. Passively Q-switched narrow-pulse high-energy all solid-state lasers pumped by LD pulse [J]. Infrared & Laser Engineering, 2014, 43(7): 2066-2069.
岱钦,崔建丰,毛有明,等.LD脉冲泵浦被动调Q窄脉冲大能量全固态激光器[J].红外与激光工程,2014,43(7):2066-2069.
- [5] SU Yanli, LUO Xu, ZHANG Xuehui, et al. Repetition rate continuously tunable microchip laser passively Q-switched by Cr⁴⁺:YAG [J]. Infrared & Laser Engineering, 2014, 43(2): 355-359.
苏艳丽,罗旭,张学辉,等.重复频率连续可调谐的Cr⁴⁺:YAG被动调Q微片激光器[J].红外与激光工程,2014,43(2):355-359.
- [6] CHEN Sunyuan, YANG Hailong, WANG Mingjian, et al. Analysis of natural longitudinal mode selection in passively Q-switched laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8): 0801006.
陈苏园,杨海龙,王明建,等.被动调Q激光器中的纵模自然选择分析[J].中国激光,2016,43(8):0801006.
- [7] PAVAL N, TSUNEKANE M, TAIRA T. Enhancing performance of a passively Q-switched Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG microlaser with a volume Bragg grating output coupler [J]. Optics Letters, 2010, 35(10): 1617-1619.
- [8] REN Deming, QIAN Liming, ZHAO Weijiang, et al. Passively Cr⁴⁺:YAG Q-switched single-longitudinal-mode Nd:YAG laser with volume Bragg grating output mirror[J]. Journal of Infrared Millimeter Waves, 2012, 31(5): 389-392.
任德明,钱黎明,赵卫疆,等.体光栅输出被动Cr⁴⁺:YAG调Q单纵模Nd:YAG激光器研究[J].红外与毫米波学报,2012,31(5):389-392.
- [9] ZHENG Y, TAKASHI S, TAKASHI K, et al. Continuous-wave dual-wavelength operation of a distributed feedback laser diode with an external cavity using a volume Bragg grating[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2018, 57(3): 030307.

-
- [10] BERTHOMÉ Q, GRISARD A, FAURE B, et al. Actively Q-switched tunable single-longitudinal-mode 2 μm Tm: YAP laser using a transversally chirped volume Bragg grating [J]. *Optics Express*, 2020, 28(4): 5013-5021.
- [11] FAN F, CHRISTOPH P. Modeling passively Q-switched solid state lasers with multimode [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2014, 38(24): 6052-6065.
- [12] WANG Yuye, XU Degang, XIONG Jingping, et al. Numerical modeling of QCW-pumped passively Q-switched Nd: YAG lasers with Cr³⁺: YAG as saturable absorber [J]. *Chinese Physics Letters*, 2008, 25(8): 2880-2883.
- [13] MERCER C J, TSANG Y H, BINKS D J. A model of a QCW diode pumped passively Q-switched solid state laser [J]. *Journal of Modern Optics*, 2007, 54(12): 1685-1694.
- [14] IGOR V C, LEONID B G, VADIM I S. Modeling of Gaussian beam diffraction on volume Bragg gratings in PTR glass [C]. *SPIE*, 2005: 5742.
- [15] SHI Tan, SUN Zhe, HUI Yongling, et al. A single-longitudinal-mode and narrow-pulse-width Q-switched Nd: YVO₄ laser controlled by a reflecting volume Bragg grating [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2012, 23(11): 2106-2111.
石坦, 孙哲, 惠勇凌, 等. 基于反射式体布拉格光栅的窄脉宽单纵模激光器 [J]. *光电子·激光*, 2012, 23(11): 2106-2111.
- [16] KOECHNER W. Solid-state laser engineering [M]. New York: Springer, 2006.
- [17] LEONMID G. Fluorinated silicate glass for conventional and holographic optical Elements [C]. *SPIE*, 2007, 6545: 654507.
- [18] BI Guojiang, JIANG Yifei, MAO Xiaojie, et al. Solid state laser with narrow pulse time and narrow line width on the repetition of 10 kHz [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(3): 296-299.
秘国江, 姜逸飞, 毛小洁, 等. 10kHz 窄脉宽窄线宽固体激光器技术 [J]. 2017, 47(3): 296-299.
- [19] EFIMOV O, GLEBOV L, ANDRE H. Measurement of the induced refractive index in a photothermorefractive glass by a liquid-cell shearing interferometer [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(10): 1864-1871.