

用于种子注入的Nd:YAG调Q激光振荡器设计与研究

龙江雄¹, 李刚¹, 杨彬², 于广礼², 丁建永², 姚红权²

(1. 陆军工程大学电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003;

2. 南京先进激光技术研究院, 先进全固态激光技术研发中心, 江苏 南京 210046)

摘要:为研制全固态单频调Q激光器, 研究设计了用于种子注入的Nd:YAG调Q激光振荡器, 通过理论分析并结合谐振腔指标要求确定了激光谐振腔的腔长和最佳输出镜透过率。实验中, 振荡器自由运转时, 最高输出功率8.21 W, 光光效率和斜效率分别为38%和47.7%。工作在调Q状态时, 输出脉冲功率为4.28 W, 脉冲宽度为6.6 ns, 其斜率效率为28.9%。计算得到脉冲能量为8.6 mJ, 对应的峰值功率为1.3 MW。测得输出光束质量指标为 $M_x^2 = 1.22$ (水平方向), $M_y^2 = 1.29$ (垂直方向), 接近衍射极限。实验得到的结果满足预期指标要求。

关键词:全固态激光器; 端面泵浦; 电光调Q

中图分类号: TN242 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2018.07.009

Design and research of Q-switched Nd:YAG oscillator for seed injection

LONG Jiang-xiong¹, LI Gang¹, YANG Bin², YU Guang-li², DING Jian-yong², YAO Hong-quan²

(1. Army Engineering University, Department of Electrical and Optical Engineering, Shijiazhuang 050003, China;

2. Advanced All Solid State Laser Technology R&D Center, Nanjing Institute of Advanced Laser Technology, Nanjing 210046, China)

Abstract: A Q-switched Nd:YAG oscillator for seed injection was designed to develop all solid state single-frequency Q-switched laser. The cavity length of the oscillator and the optimum transmittance of the output coupler are identified via theoretical analysis together with index requirement. In the experiment, the oscillator has maximum output power of 8.21 W when operating at free-running mode. The optical-to-optical efficiency is 38% and the slope efficiency is 47.7%. A pulse power of 4.28 W and a pulse width of 6.6 ns are obtained in the Q-switched operation, corresponding to the slope efficiency of 28.9%. The pulse energy is 8.6 mJ and the pulse peak power is 1.3 MW. The output beam qualities of $M_x^2 = 1.22$ (horizontal direction) and $M_y^2 = 1.29$ (vertical direction) are tested, which is fraction-limit-ed. The results of the experiment is satisfied to the anticipated index requirements.

Key words: all solid state laser; end pumped; electro-optical Q-switch

1 引言

全固态单频激光器由于其窄线宽和较长的相干长度在激光测风雷达^[1-2]、引力波探测^[3-4]以及泵浦光参量振荡器^[5]等领域应用广泛。目前常用的实现高功率单频激光输出的技术是种子注入谐振振

测技术, 是根据种子光与腔内振荡模式的干涉情况调节腔长, 在合适的时机打开Q开关, 从而输出线宽较窄的单频激光。

调Q振荡器在该类单频激光器中起着至关重要的作用, 其输出光束质量, 脉冲能量及脉冲宽度

作者简介: 龙江雄(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事固体激光技术方面的研究工作。E-mail: drhero@163.com

通讯作者: 李刚(1973-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事军用激光技术方面的研究工作。E-mail: ligangopt@sina.com

收稿日期: 2017-12-27

直接决定着种子注入的单频激光器的相应指标。本文对调Q振荡器的输出脉冲功率和脉冲宽度进行了理论分析,并根据需要的单频激光器的能量和脉宽指标要求(脉冲能量>8 mJ,脉宽<7 ns)确定了最佳输出镜透过率这个对振荡器输出能量有重要影响的参数。通过分析得到理论上的热透镜焦距,确定腔长范围,并研究了在不同腔长条件下,输出脉冲宽度的变化情况,最终确定了合适的腔长。根据这些参数进行实验,最终实现了脉冲能量8.6 mJ、脉冲宽度6.6 ns、重复频率500 Hz的激光脉冲输出,光束质量指标为水平方向 $M_x^2 = 1.22$,垂直方向 $M_y^2 = 1.29$ 。

2 理论分析

根据速率方程理论,由于调Q脉冲持续时间极短,Q开关期间可忽略泵浦和自发辐射对输出激光能量的影响,因此调Q运转的速率方程可表示如下^[6]:

$$\begin{cases} \frac{d\phi}{dt} = \frac{\sigma n \phi l}{t_R} - \frac{\varepsilon}{t_R} \\ \frac{dn}{dt} = -\frac{4\sigma n \phi l}{t_R} \end{cases} \quad (1)$$

式中, ϕ 为墙内光子数密度; n 为反转粒子数密度; σ 为受激发射截面积; l 为激光晶体长度; ε 为墙内损耗; t_R 为光子在腔内的往返时间。其中:

$$t_R = 2l'/c \quad (2)$$

$$\varepsilon = -\ln R_1 - \ln R_2 + L + \zeta(t) \quad (3)$$

式中, l' 为谐振腔对应的往返光程; R_1 和 R_2 分别为后腔镜和前腔镜的反射率; L 为往返损耗; $\zeta(t)$ 为阶跃函数,在Q开关处于关闭状态时,其值为1。

联立公式(1)~(3),可得到Q开关激光器运转的解析解^[7],Degnan^[8]进一步对该结果进行优化后得出输出脉冲能量 E_{out} 和输出镜最佳透过率 R_{opt} 的另一种较为简洁的表达式:

$$E_{out} = \frac{Ah\nu L}{2\sigma\gamma}(z-1-\ln z) \quad (4)$$

$$R_{opt} = \exp\left[-L\left(\frac{z-1-\ln z}{\ln z}\right)\right] \quad (5)$$

其中, $z = 2g_0 l/L$ 为单一无量纲变量函数; g_0 为小信号增益; A 为有效光束截面积,在高斯泵浦光束中取平均泵浦光斑面积; $h\nu$ 受激辐射光子能量; γ 为简并因子。

利用优化后的解析解可以比较方便地求出最佳输出镜反射率。要求谐振腔输出的1064 nm激光脉冲能量大于8 mJ、脉冲宽度小于7 ns。将 $E_{out} = 8.5$

mJ代入公式(4),结合表1所示参数可计算出 $z = 12.5$,将其代入公式(5)可得 $R_{opt} = 70.1\%$ 。根据理论分析结果,选择透过率为70%的平平透镜作为耦合输出镜。

表1 上述公式中的相关参数

Tab. 1 Related parameter in the above equations

Parameters	Value	Parameters	Value
A	0.02 cm^2	L	0.1
$h\nu$	$1.86 \times 10^{-19} \text{ J}$	σ	$2.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$
γ	0.7	c	$3 \times 10^{10} \text{ cm/s}$

激光晶体的热透镜焦距可以用下式进行估算^[6]:

$$f_T = \frac{\pi K_c \omega_p^2}{\eta P_{in} (dn/dT)} \left(\frac{1}{1 - \exp(-\alpha l)} \right) \quad (6)$$

其中, $\eta = 32\%$ 为转化为热的功率与吸收的功率之比; $K_c = 0.18 \text{ W/(cm} \cdot \text{K)}$ 为热传导系数; $dn/dT = 7.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 表示折射率随温度变化的变化量; $\alpha = 4.1 \text{ cm}^{-1}$ 为晶体的吸收系数,以上四个参量为Nd:YAG晶体的材料参量; P_{in} 表示晶体吸收的功率,正常工作时, $P_{in} = 22 \text{ W}$ 。泵浦光通过耦合系统在晶体中的平均光斑半径约为0.6 mm。将以上参量代入公式(6)可计算得到热透镜焦距为396 mm。实验腔型采用平平腔结构,为使谐振腔工作在稳定区域,谐振腔长度必须小于晶体在最大泵浦功率下晶体的热焦距396 mm。为满足脉宽指标要求,需测量不同腔长条件下输出脉冲宽度来确定合适的腔长范围。

3 实验装置

实验装置如图1所示,谐振腔为U型腔,由透过率为5%的后腔镜(M1)、透过率为70%的前腔镜(M2)和两片1064/808 nm分色镜(DM:对808 nm高透 & 对1064 nm高反)组成;激光晶体采用长度40 mm、直径4 mm的键合Nd:YAG晶体,其中 Nd^{3+} 离子掺杂浓度为0.5 at.%,掺杂长度为30 mm,两端未掺杂部分长度均为5 mm,未掺杂晶体能够作为热沉,有利于晶体散热,从而降低热量积累引起的热致退偏和热透镜效应。晶体两端面分别镀有1064 nm & 808 nm增透膜,晶体由铝箔裹着装在紫铜热沉中,连接水冷机进行散热,控制其温度在 $(21 \pm 1)^\circ\text{C}$,因为通过实验得知在此温度下,晶体对泵浦光的吸收率较高。腔内光学元件还包括、工作电压为4200 V的Q晶体(KDP)、四分之一波片($\lambda/4$)、和薄膜偏振片(TFP)。

单频种子激光从后腔镜注入谐振腔。泵浦二极管(LD)为 nLIGHT 公司的 Pearl 型产品,中心波长 808 nm,最高连续输出功率为 200 W,额定工作电流 7.5 A,由光纤导光,纤芯直径 600 μm 。由于 Nd:YAG 上能级粒子寿命为 230 μs ,为尽可能提高谐振腔输出功率,设置 LD 输出信号脉冲宽度为 250 μs ,重复频率为 500 Hz。泵浦耦合系统由两片焦距分别为 38 mm 和 20 mm 的平凸透镜以及防回光保护镜组成,聚焦腰斑在 0.8 ~ 1.6 mm 范围内可调。

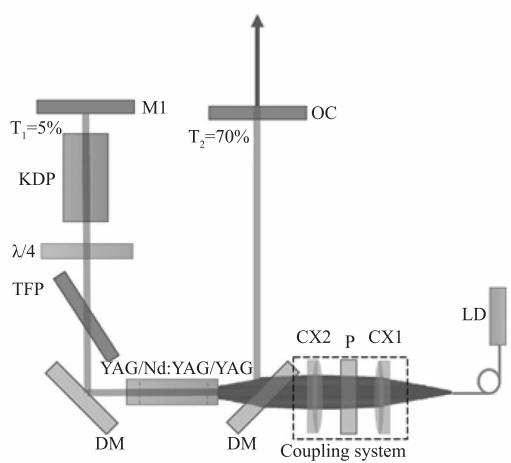


图1 实验装置原理图

Fig. 1 Schematic of experiment setup

4 实验结果及分析

首先通过测量四种不同腔长(340 mm、290 mm、250 mm、220 mm)条件下输出脉冲宽度,得到了如图2所示结果,从图中可以看出,腔长越长,输出脉冲宽度越短,且在泵浦功率 17.7 W 时,输出脉冲宽度均能满足小于 7 ns 的要求,我们认为在腔长处于 220 ~ 340 mm 之间的长度都是合适的。为保证光学元件的工作稳定性,尽量使系统工作时的峰值功率尽可能低,将腔长设置为 300 mm。

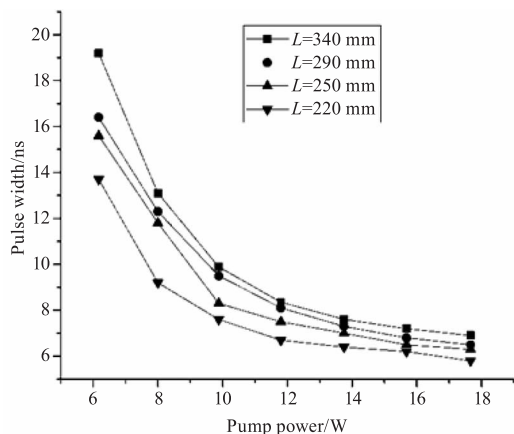


图2 不同腔长条件下输出脉冲宽度随泵浦功率的变化关系

Fig. 2 The pulse width as a function of pump power at different cavity length

由于 LD 的额定工作电流为 7.7 A,将最大工作电流(限制电流)设置为 7.5 A,此时泵浦功率为 21.6 W。用 L40(150) A-v2 型功率计测量自由运转时,振荡器最大输出功率为 8.21 W,对应的光光效率为 38%,斜率效率为 47.7%。其输出特性曲线如图3所示,从图中可以看出,随着泵浦功率增加,振荡器自由运转时输出功率线性增加。在调 Q 工作状态下,振荡器在泵浦功率 17.7 W 时,输出脉冲功率 4.28 W,脉冲宽度 6.6 ns,重复频率 500 Hz,计算得到脉冲能量为 8.6 mJ,对应的峰值功率为 1.3 MW,其斜率效率为 28.9%,这一数值小于自由运转时的对应数值,原因可能是随着泵浦功率的增加,激光晶体和 Q 晶体的热致退偏效应越来越明显^[9-10],导致输出的水平偏振光减少。之所以在调 Q 状态下未使泵浦 LD 工作在最大电流,是因为在实验中当设置 LD 工作电流为 7.5 A 时,Q 晶体的镀膜面被激光打坏,因此为保证激光器长久稳定运行,调 Q 时的泵浦电流最大限制在 6.5 A,而且此时的振荡器输出脉冲能量已经能够满足要求。用带宽为 500 MHz 的 PIN 管和示波器测量输出激光的脉宽,其脉宽特性如图3所示。泵浦功率 17.7 W 时,输出脉冲波形如图4所示。在此泵浦功率条件下,用 M2-200s-FW 型光束质量分析仪测量激光光束质量,得到的结果如图5所示,水平方向 $M_x^2 = 1.22$,垂直方向 $M_y^2 = 1.29$,接近光束衍射极限,其远场能量空间分布如图6所示。从对光束质量的测量结果中可以得到,输出基模在束腰处的光斑半径约为 700 μm ,根据平平谐振腔中的高斯分布可知在两个腔镜上的光斑分布面积最小,计算得到在输出镜上的峰值功率密度约为 338 MW/cm^2 ,小于光学元件的损伤阈值。功率稳定性测量结果如图7所示,1 h 功率波动范围小于 0.5%,功率稳定性较好。

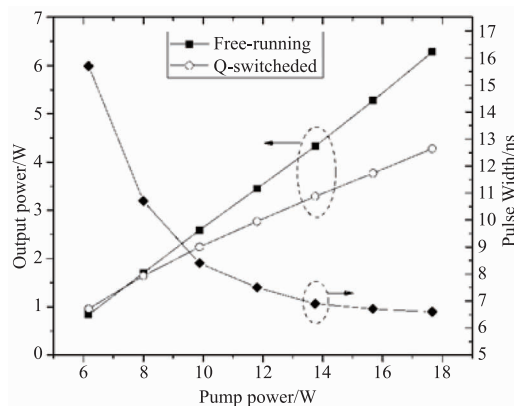


图3 振荡器的输出功率及脉宽特性

Fig. 3 Characteristics of output power and pulse width of oscillator

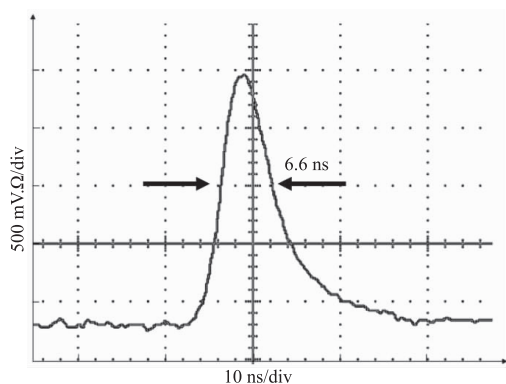


图4 泵浦功率17.7 W时输出脉冲波形

Fig. 4 The pulse waveform at the pump power of 17.7 W

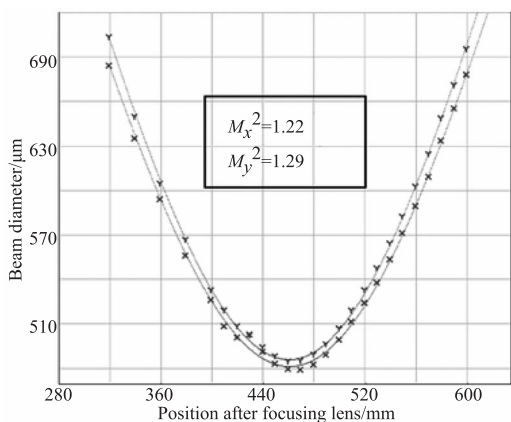


图5 基模光束质量测试结果

Fig. 5 The testing result of the beam quality of TEM00

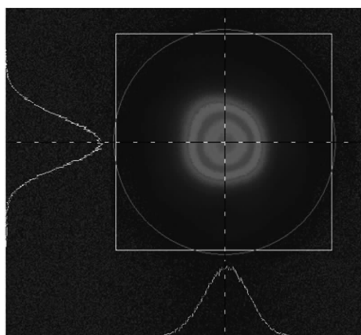


图6 远场光斑空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of spot in the far field

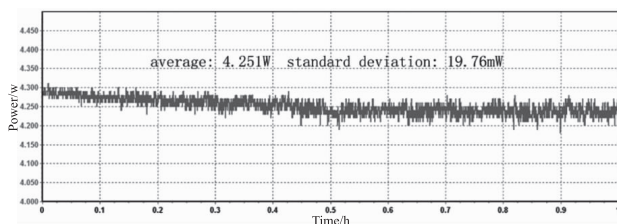


图7 输出光功率稳定性测量结果

Fig. 7 The testing results of stability of output power

5 结论

通过理论分析设计并搭建了用于单频种子注入的调Q激光振荡器,振荡器在自由运转时,最高能

输出功率8.21 W,对应的光光效率和斜效率分别为38%和47.7%。调Q运转时,输出脉冲平均功率为4.28 W,脉冲宽度为6.6 ns,相应的脉冲能量为8.6 mJ,峰值功率为1.3 MW,调Q斜效率为28.9%。光束质量指标为 $M_x^2 = 1.22$, $M_y^2 = 1.29$,接近衍射极限。设计的振荡器满足预期指标,而且输出光束质量较好,可用于研制种子注入的单频激光器,也可作为独立使用的调Q脉冲激光器。

参考文献:

- [1] Zhigang Li, Christian Lemmerz, Ulrike Paffrath, et al. Airborne doppler lidar investigation of sea surface reflectance at a 355 nm ultraviolet wavelength[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2010, 27(4): 693-704.
- [2] IA Razenkov. Aerosol lidar for continuous atmospheric monitoring[J]. Atmospheric and Oceanic Optics, 2013, 26(4): 308-319.
- [3] Maik Frede, Ralf Wilhelm, René Gau, et al. High-power single-frequency Nd:YAG laser for gravitational wave detection[J]. Classical and quantum gravity, 2004, 21(5): S895.
- [4] Maik Frede, Ralf Wilhelm, Dietmar Kracht, et al. Nd:YAG ring laser with 213 W linearly polarized fundamental mode output power[J]. Opt Express, 2005, 13(19): 7516-7519.
- [5] X B Xie, X L Zhu, S G Li, et al. Injection-seeded single frequency 2.05 μm output by ring cavity optical parametric oscillator[J]. Chinese Optics Letters, 2017, 15(9): 5.
- [6] Koechner. Solid state engineering[M]. Beijing: The Science Publishing Company, 2002. (in Chinese)
克希耐尔. 固体激光工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [7] William G Wagner, Bela A Lengyel. Evolution of the giant pulse in a laser[J]. Journal of Applied Physics, 1963, 34(7): 2040-2046.
- [8] John J Degnan. Theory of the optimally coupled Q-switched laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1989, 25(2): 214-220.
- [9] SZ Kurtev, OE Denchev, SD Savov. Effects of thermally induced birefringence in high-output-power electro-optically Q-switched Nd:YAG lasers and their compensation[J]. Appl Optics, 1993, 32(3): 278-285.
- [10] WA Clarkson, NS Felgate, DC Hanna. Simple method for reducing the depolarization loss resulting from thermally induced birefringence in solid-state lasers[J]. Opt Lett, 1999, 24(12): 820-822.