

文章编号:1002-2082(2018)02-0274-05

二极管泵浦折叠式电光调Q激光器

闫雪静^{1,2}, 庞毓¹, 叶一东¹, 蒋建峰¹, 孙舒娟^{1,2}, 张旭光^{1,2}, 阮旭¹

(1. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院 研究生部, 北京 100088)

摘要: 针对机载激光测距及激光指示应用需求, 设计了一种紧凑可靠的电光调Q脉冲激光器。从调Q速率方程出发, 分析了激光器输出能量随优化参数 z 增大而增大、脉宽随 z 增大而减小的关系。采用 $\phi 6\text{ mm} \times 56\text{ mm}$ 的Nd: YAG激光晶体, LD侧面泵浦, 角锥棱镜作为折光器的u形折叠式非稳腔, 在增益满足的前提下, 提高谐振腔抗失调能力。在注入电脉冲1.2 J条件下, 激光器单脉冲能量输出为108 mJ, 脉冲宽度为11.8 ns, 能量不稳定度<0.8%; 光-光效率18%, 可长时间稳定运行。

关键词: 激光技术; 电光调Q; 角锥棱镜; 侧面泵浦

中图分类号: TN248

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO201839.0207002

LD pumped folded electro-optic Q-switched laser

Yan Xuejing^{1,2}, Pang Yu¹, Ye Yidong¹, Jiang Jianfeng^{1,2}, Sun Shujuan^{1,2},
Zhang Xuguang^{1,2}, Ruan Xu¹

(1. Institute of Applied Electronics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621000, China;

2. Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China)

Abstract: Aiming at the applying demand of airborne laser ranging and laser indication, a compact and reliable electro-optical Q-switched laser was designed. Based on the rate equation with Q-switched, the relationship that the laser output energy increased with the increasing optimization parameter z and the pulse width decreases with increasing z was analyzed. The Nd: YAG laser crystal of $\phi 6.5\text{ mm} \times 56\text{ mm}$, LD side pump, u model of folded cavity which applied cube-corner prism for folding the light, was used as the resonator cavity. The anti-misalignment ability of resonator cavity can be improved under the premise of gain satisfaction. Under the condition of 1.2 J implanted electrical pulse, the energy output of laser single pulse is 108 mJ, the pulse width is 11.8 ns, the energy instability is less than 0.8% and the light efficiency is 18%, which can be stably operated for a long time.

Key words: laser technology; electro-optic Q-switching; cube-corner prism; side-pumped

引言

半导体泵浦固体激光器具有光-光转换效率高、光束质量好、结构紧凑、寿命长、使用和维护方便, 在众多领域中都得到了广泛应用^[1]。在某机载激光测距、激光指示等应用中, 需要能量约100 mJ、脉宽约10 ns的半导体泵浦固态激光器,

要求体积小, 质量轻, 能适应机载振动、冲击、高低温、电磁兼容等工作环境。Cr: YAG作为被动开关的被动调Q激光器, 易发生多模运转及模式竞争^[2-3], 导致输出能量不稳定, 而电光调Q具有高效率、性能稳定的特点。但传统的电光调Q激光器由于腔内能量集中, 容易造成电光晶体及膜层

收稿日期: 2017-09-22; 修回日期: 2017-10-10

基金项目: 国家十三·五项目

作者简介: 闫雪静(1992—), 女, 天津宝坻人, 硕士研究生, 主要从事固体激光器研究。E-mail: yanxuejinghit@163.com

损伤^[4-6]。同时,在恶劣的机载环境下,普通腔型的二极管泵浦激光器容易产生机械变形和热应力效应^[7-8]。采用角锥棱镜作为折光器,可以使激光器在强机械扰动和热扰动的外界环境下,仍然能够保持准直并维持激光输出功率的稳定。因此,在激光测距、激光指示等领域中,二极管泵浦折叠式无水冷电光调 Q 激光器具有良好的应用前景。

1 原理与设计

1.1 调 Q 优化理论

快速调 Q 激光器的速率方程^[9]:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{2\sigma nl\phi}{t_r} - \frac{\phi}{t_c} \quad (1)$$

$$\frac{dn}{dt} = -\gamma\sigma c\Delta n \quad (2)$$

式中: l 为增益介质长度; σ 为受激发射截面; c 是真空中光速; $t_r = \frac{2l'}{c}$ 是光在谐振腔内的往返时间; γ 为反向简并因子; t_c 为光子寿命。

$$t_c = \frac{t_r}{[\ln(1/R) + L]} \quad (3)$$

式中: R 是输出镜反射率; L 为往返损耗。

Wagner^[10]等人推导出速率方程的解,并用下式表示 Q 开关激光器输出能量和脉宽:

$$E = \frac{h\nu A}{2\sigma\gamma} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \ln\left(\frac{n_i}{n_f}\right) \quad (4)$$

$$t_p = \tau_c \frac{n_i - n_f}{n_i - n_f [1 + \ln(n_i/n_f)]} \quad (5)$$

初始和最终的反转粒子数密度 n_i 和 n_f ,以及阈值反转粒子数密度的表达式:

$$n_i - n_f = n_t \ln\left(\frac{n_i}{n_f}\right) \quad (6)$$

$$n_t = \frac{1}{2\sigma l} \left(\ln \frac{1}{R} + L \right) \quad (7)$$

式中: $h\nu$ 为光子能量; A 为有效光束截面。

Degnan^[11]推导出优化 Q 开关激光器运转的解析解,把脉宽、能量、折射率等参量用单一的量纲为 1 的变量函数 z 来表示。优化参数 z :

$$z = 2g_0 l / L \quad (8)$$

式中: $2g_0 l$ 为对数小信号增益; L 为往返损耗。

用优化参数表示脉宽

$$t_p = \frac{t_r}{L} \frac{\ln z}{z-1} \cdot \frac{1}{\frac{z}{z-1} - \frac{1}{\ln z} \left[1 + \ln \frac{z \ln z}{z-1} \right]} \quad (9)$$

选定激光晶体有效增益长度为 3 cm,通过改

变泵浦电流,获得腔内不同增益。

分别考虑 $L = 0.02, 0.05, 0.1, 0.15$ 时,脉宽随 z 的变化趋势图像(图 1)。

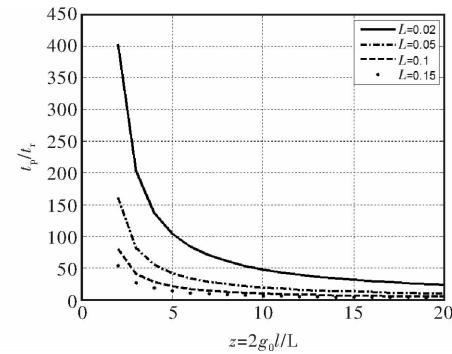


图 1 t_p/t_r 与 z 的关系图

Fig. 1 Relationship between t_p/t_r and z

从图 1 我们可以看出, z 值增大时, 脉宽变短; 当 z 值保持不变, 增益和损耗同时增大时, 脉宽减小。

用优化参数表示激光器输出能量:

$$E = \frac{A h \nu L}{2\sigma\gamma} (z - \ln z - 1) \quad (10)$$

图 2 为能量与 z 的关系图。

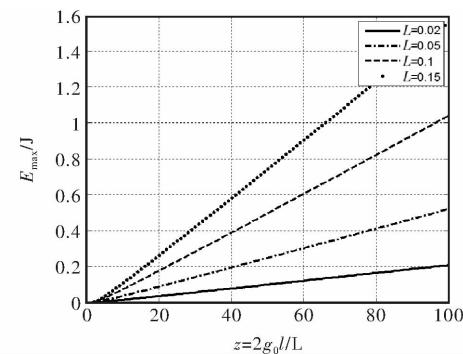


图 2 能量与 z 的关系图

Fig. 2 Relationship between energy and z

根据图 2 我们得知, 激光器输出能量随 z 值增大而增大。

在激光器设计过程中, 根据所要得到的输出激光器能量和脉宽, 可通过确定谐振腔腔长、激光晶体长度和小信号增益系数确定 z 值, 从而得到满足要求的脉宽、能量。

按照上述过程对激光器进行设计, 取 $g_0 = 0.33 \text{ cm}^{-1}$, 腔长 26 cm, $h\nu = 1.86 \times 10^{19} \text{ J}$, 经过测量谐振腔往返损耗 $L = 0.15$, 增益介质长度 $l = 0.03 \text{ m}$, 得到:

$$g_0 = 0.33 \text{ cm}^{-1}, z = 2g_0 l / L = 1.98 / L = 13.2$$

$$E = \frac{h\nu AL}{2\sigma} (z - \ln z - 1) =$$

$$\frac{1.86 \times 10^{-19} \times \pi \times (6 \text{ mm}/2) \times 0.15}{2 \times 2.8 \times 10^{-23}} \times$$

$$(13.2 - \ln 13.2 - 1) = 135 \text{ mJ}$$

$$t_r = \frac{2 \times l'}{c} = \frac{2 \times (1.82 \times 0.06 + 0.2)}{3 \times 10^8} = 2.06 \text{ ns}$$

$$t_p = \frac{t_r}{L} \times \frac{\ln z}{z-1} \times \frac{1}{\frac{z}{z-1} - \frac{1}{\ln z} \left(1 + \ln \frac{z \ln z}{z-1}\right)} = 9.8 \text{ ns}$$

1.2 激光器结构设计

1.2.1 泵浦模块设计

根据激光器性能指标要求,拟采用环形一体化泵浦模块。目前对于 LD 侧面泵浦电光调 Q Nd : YAG 激光器,808 nm 抽运光到 1 064 nm 电光调 Q 激光的光-光转换效率一般是 10%~20%,指标要求输出激光脉冲能量约等于 100 mJ,取最低转换效率 10%^[4],泵浦光的单脉冲能量约 1 J,因此,泵浦源的泵浦功率约 4 kW,泵浦模块的腔体采用 9 边环形泵浦腔,泵浦源由 3 个模块组成,每个模块的泵浦功率设计为 1.35 kW,额定工作电流设计为 150 A,总的额定泵浦功率大于 4 kW。

泵浦模块主要由二极管激光器、晶体棒、热沉结构组件组成。泵浦模块和晶体棒的热量通过热传导导出,采用 TEC 制冷、风扇散热的方式,结合低温环境下电加热的精密温控,实现 -40°C~60°C 宽温区环境工作,结构如图 3 所示。

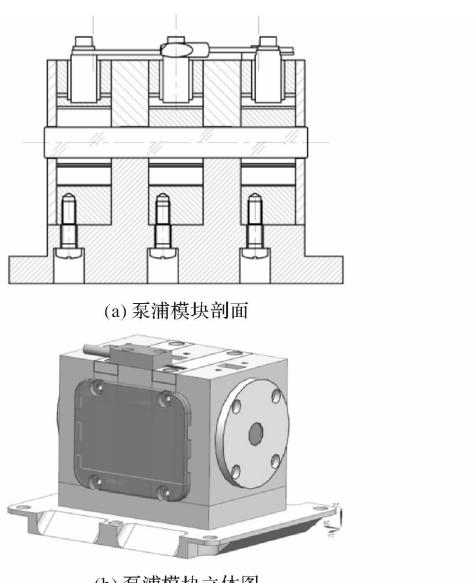


图 3 泵浦模块整体结构

Fig. 3 Overall structure of pump module

光源内部小平台、光源平台材料均使用航空

铝材,以减小温度变化引起的位置改变,同时减轻质量。光学元件材料选用吸收小、热稳定性高的石英材料,用以降低温度变化对光学像差的影响。增益模块采用销钉定位方式与光源平台相连,避免温度、振动等因素引起增益模块位置的变化。

1.2.2 谐振腔设计

激光谐振腔采用大模体积 u 形折叠式非稳腔。激光器光路分系统由 1 064 nm 高反镜、调 Q 晶体、λ/4、角锥棱镜、Nd : YAG 激光增益模块、楔形镜、1 064 nm 输出镜组成。其中角锥棱镜不作为腔镜使用,仅对光路折叠,泵浦模块、楔形镜与输出镜组成一条光路,偏振镜、1/4 波片、电光 Q 开关、高反镜组成另一条光路,两条光路通过后向反射器连接,形成折叠谐振腔,光路原理图如图 4 所示。

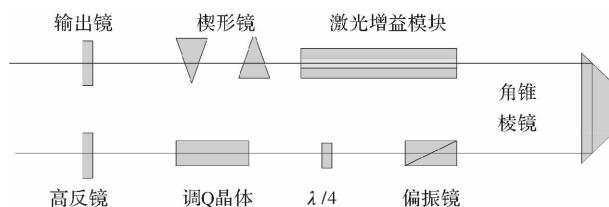


图 4 u 形调 Q 激光腔原理图

Fig. 4 Schematic diagram of u shaped Q switched laser cavity

在激光器的折叠式非稳腔设计中,在输出镜前加入楔形镜有助于调节光路和减小光路偏折,提高可靠性。激光器前后腔镜并排固定在热膨胀系数很小的刚性结构上,前后腔镜在机载环境角位移很小,能保证良好的对准,提高了激光器的稳定性,解决了激光器在机载环境中的抗振动问题。

1.2.3 半导体温控设计

目前对于 LD 侧面泵浦电光调 Q Nd : YAG 激光器,808 nm 抽运光到 1 064 nm 电光调 Q 激光的光-光转换效率一般是 10%~20%,指标要求输出激光脉冲能量约等于 100 mJ,取最低转换效率 10%^[4],泵浦光的单脉冲能量约 1 J,泵浦光平均功率约 20 W。以激光二极管 40% 的电光转换效率计算,产生的热功率 30 W。对于中小功率 LD 泵浦激光器的温度控制,TEC 的体积小、温控精度高等优点得到充分体现。通过计算得到的发热功率 30 W,注入 TEC 的总电功率约为 60 W。采用 2 块 TEC 串联对 LD 进行温控,每块 TEC 提供制冷量约 15 W,TEC 冷热面最大允许温差不大于 30°C。

当TEC电流一定时,制冷量随冷热端的温差增大而降低。为了提供足够的制冷量,对TEC热端进行充分散热是必须的,当保证TEC冷热端温差不能超过最大温差时,才能达到期望的制冷效果。

2 实验

用OPHIR公司PE-50型激光功率计探头和泰克仪器公司Tektronix DPO7354示波器测量脉冲激光的能量和脉宽。在注入电流110 A,电压47 V,脉宽230 ms(电脉冲能量约1.2 J),激光输出的脉冲波型和脉冲能量如图5和图6所示。

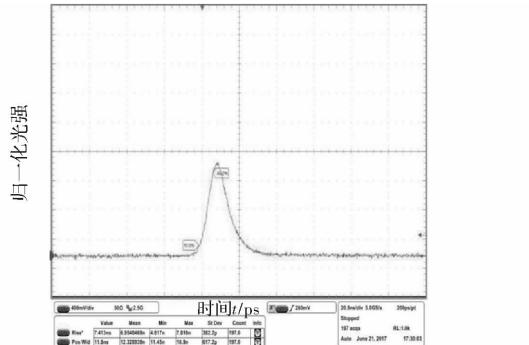


图5 输出能量单脉冲图

Fig. 5 Single pulse drawing of laser output energy

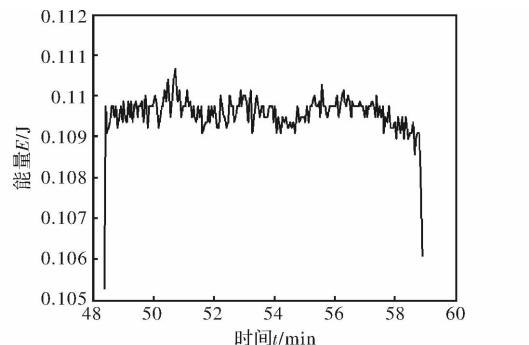


图6 输出能量稳定性曲线

Fig. 6 Stability curve of output energy

从图5中可见,其脉冲宽度约为11.8 ns。图6表明了在此注入电流下,激光输出能量起伏情况,实测得到激光输出能量平均值为108 mJ,激光输出能量的不稳定度<0.8%。获得的激光器电光效率约9%,光-光效率约18%。

3 结论

研制了一种无水冷、具有角锥棱镜折叠腔型

的电光调Q全固态脉冲激光器。采用此结构设计的激光器,获得了波长1.06 μm、脉冲宽度11.8 ns、脉冲能量108 mJ的低阶模激光输出。此激光器无水冷、结构紧凑、体积小,且输出能量稳定,已用于机载环境考核试验并得到实际应用。

参考文献:

- [1] WANG Chunyu, LI Xiaoli, ZANG Huaguo, et al. Laser diode continuous-wave-pumped repetitive electric-optic Q-switched Nd: YVO₄ laser[J]. Chinese J. Lasers, 2006(11):1441-1446.
- [2] 王春雨,李小莉,臧华国,等.激光二极管连续抽运电光调Q Nd: YVO₄激光器[J].中国激光,2006(11):1441-1446.
- [3] OUYANG Bin, DING Yanhua, WAN Xiaoke, et al. Saturable absorption of Cr⁴⁺: YAG and its performance as passive Q-switches[J]. Acta Optical Sinica, 1996, 16(12): 1665-1670.
- [4] 欧阳斌,丁彦华,万小珂,等. Cr⁴⁺: YAG的可饱和吸收特性与被动Q开关性能研究[J].光学学报,1996, 16(12): 1665-1670.
- [5] NING Guobin, LIAGN Zhu, ZHAO Zhenming et al. High repetition rate electric optical Q-switching of CW Nd: YAG laser[J] Acta Optica Sinica, 2000 (11):1481-1485.
- [6] 宁国斌,梁柱,赵振明,等.连续Nd: YAG激光高重复率电光调Q研究[J].光学学报,2000(11):1481-1485.
- [7] NING Jiping, ZHANG Xinjie, SUN Xiaowei, et al. Diode-pumped Q-switched Nd: YAG laser[J] Chinese J Quant Electr., 1995,12 (2): 137-141.
- [8] 宁继平,张新杰,孙小卫,等.激光二极管泵浦的调Q Nd: YAG激光器的理论研究[J].量子电子学,1995,12 (2): 137-141.
- [9] JI Jianghua, QI Yunfeng, MENG Junqing, et al. Laser-diode pumped Q-switched ceramic Nd: YAG laser with 5 W output[J]. Chinese Journal of Laser, 2006, 33 (2) :157-160.
- [10] 纪江华,漆云凤,孟俊清,等.输出5 W的电光调Q Nd: YAG陶瓷激光器[J].中国激光,2006, 33 (2) :157-160.
- [11] LUIS Ramos-lzquierdo, BUFTON Jack L, HAYES Patricia. Optical system design and integration of the Mars ob server laser altimeter[J]. Appl. Opt., 1994, 33(3): 307-322.
- [12] LU Changyong, LI Li, LIU Xu, et al. Laser diode-

- pumped passively Q-Switched laser with corner-cube resonator [J]. *Acta Optical Sinica*, 2007 (7): 1228-1231.
- 卢常勇, 李莉, 刘旭, 等. 角锥棱镜腔激光二极管抽运被动调 Q 激光器 [J]. 光学学报, 2007 (7): 1228-1231.
- [8] KCHENER W. Solid laser engineering [M]. Translated by SUN Wen. Beijing: Science Press, 2002.
- W 克希奈尔. 固体激光工程 [M]. 孙文, 译. 北京: 科学出版社, 2002.
- [9] WAGNER W G, LENGYEL B A. Evolution of the giant pulse in a laser [J]. *J. Appl. Phys.*, 1963, 34 (7): 2040-2046.
- [10] DEGNAN J J. Theory of the optimally coupled Q-switched laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 25(2): 214-220.