

## Nd:YAG 调 Q 激光器失稳现象的理论及实验研究

曹明真, 刘学胜\*, 何欢, 刘友强, 王智勇

(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124)

**摘要:**报道了一种 Nd:YAG 调 Q 短脉冲激光器失稳现象的理论分析及实验研究。短脉冲调 Q 激光器运行过程中,会有多种因素导致其不能稳定输出符合目标值的脉冲激光,即出现失稳现象。实验过程中发现,输出镜处的干扰光会导致短脉冲激光器出现失稳现象。在理论上,对外界干扰光对短脉冲调 Q 激光器输出光特性的影响进行了模拟计算,并进行了实验验证,分别从能量和脉宽两个特性进行讨论。结果表明:干扰能量越大,造成失稳现象越严重,干扰脉冲能量为 60 mJ 时,短脉冲调 Q 激光器输出能量损失达 15% 以上,脉宽展宽至 1.15 倍以上;干扰脉冲注入时间节点越靠后,失稳现象越严重,在短脉冲调 Q 激光器的泵浦末端,即调 Q 开关打开前注入能量为 60 mJ、脉宽为 10 ns 的干扰脉冲时,短脉冲调 Q 激光器可输出能量损失达到 80%。

**关键词:**短脉冲; Nd:YAG; 失稳现象; 调 Q 激光器

**中图分类号:** TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1105005

## Theoretical and experimental study on Nd:YAG Q-switched laser instability phenomenon

Cao Mingzhen, Liu Xuesheng\*, He Huan, Liu Youqiang, Wang Zhiyong

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** The theoretical analysis and experimental study of the instability phenomenon of a Nd:YAG Q-switched short pulse laser was demonstrated. During the operation of the short pulse laser, there were many factors that can cause the instability phenomenon. During the experiment it was found that the interference pulse which can enter into the cavity though the output mirror can cause the instability of the short pulse laser. Based on the basis of theory, the influence of external interference light on the output light characteristics of short pulse Q-switched laser was simulated and verified by experiments. The characteristics of energy and pulse width were discussed respectively. The results show that the greater the energy of interference pulse is, the more serious the instability phenomenon is. When the interference pulse energy is 60 mJ, the loss of output energy of the short pulse laser can be more than 15%. The pulse width is 1.15 times of the original, the instability phenomenon is also more serious at the pump end of the short pulse Q-switched laser. When the input energy is 60 mJ the pulse width is 10 ns, the loss of output energy of the short pulse Q-switched laser reaches 80% of the original.

**Key words:** short pulse; Nd:YAG; instability phenomenon; Q-switched laser

收稿日期: 2018-06-05; 修订日期: 2018-07-03

基金项目: 北京市教委面上项目(KM201310005019)

作者简介: 曹明真(1991-),女,硕士生,主要从事大功率半导体泵浦的全固态激光器方面的研究。Email:caomingzhen@emails.bjut.edu.cn

通讯作者: 刘学胜(1980-),男,讲师,博士,主要从事大功率半导体泵浦的全固态激光器方面的研究。Email:liuxuesheng@bjut.edu.cn

## 0 引言

短脉冲 Nd:YAG 激光器在激光加工、光电对抗、激光测距、激光通信等方面有着重要应用<sup>[1-4]</sup>,尤其是调 Q 获得的高峰值功率激光器,是众多前沿科学研究、现代科学仪器和设备中的核心器件<sup>[5-8]</sup>。近年来,随着高功率 bar 条的价格逐渐降低,LD 泵浦的全固态激光器逐渐取代闪光灯泵浦的固体激光器。激光谐振腔是激光器实现激光能量提取和输出的关键,谐振腔失稳导致输出能量下降、光束质量变差,严重时激光器失效,因此激光器失稳是激光器重要的可靠性因素之一<sup>[9-13]</sup>。

2016 年,罗旭等采用双直角棱镜腔,利用直角棱镜的自对准特性,使激光器系统对冲击、振动及温度波动保持不灵敏性,当激光器重复频率为 20 Hz 时,输出能量为 60 mJ,脉冲宽度为 11 ns,经过 10 倍扩束后发散角为 0.11 mrad,30 s 内光轴漂移量小于 5  $\mu$ rad。双直角棱镜腔能有效改善激光器光轴的稳定性<sup>[14]</sup>。2017 年,蒙裴贝等在理论上建立了包含腔镜失谐修正函数的准连续二极管泵浦、调光调 Q 固体激光器速率方程模型,采用了有限差分求解方法,得出了谐振腔失谐对应的衍射损耗以及激光器输出能量和脉冲宽度的数值解,分析了不同激光模式、晶体半径、光斑半径、晶体位置下,谐振腔失谐对谐振腔损耗和激光器输出性能的影响,为谐振腔设计提供了依据,并在实验中测量了谐振腔腔镜失谐对激光器性能的影响<sup>[15]</sup>。

文中对 Nd:YAG 短脉冲激光器的失稳现象进行了理论分析及实验研究。实验中发现,短脉冲调 Q 激光器运行过程中,会有多种因素导致其不能稳定输出符合目标值的脉冲激光,出现失稳现象。其中,当短脉冲激光器输出镜处有干扰光进入时,被干扰激光器所输出激光脉冲的能量会有较大损失,脉宽也会展宽,出现失稳现象。在此基础上,文章通过理论计算和实验验证对外界干扰光对短脉冲激光器输出光特性的影响进行了分析,分别从能量和脉宽两个方面进行讨论。可以发现,干扰能量越大,造成失稳现象越严重,干扰脉冲能量为 60 mJ 时,短脉冲调 Q 激光器可输出能量会损失 15% 以上,脉宽会展宽至 1.15 倍以上;干扰脉冲注入时间节点越靠后,失

稳现象越严重,在短脉冲调 Q 激光器的泵浦末端,即调 Q 开关打开前注入能量为 60 mJ、脉宽为 10 ns 的干扰脉冲时,短脉冲调 Q 激光器可输出能量损失达到 80%。

## 1 理论分析

在连续、高功率的固体激光器中,激光器输出镜处的干扰光会导致激光器出现失稳现象,文中通过建立数学模型,对此现象进行了理论分析,同时采用实验进行验证,如图 1 所示。将图中左侧短脉冲激光器 1 作为被干扰源,右侧短脉冲激光器 2 作为干扰源,假定干扰光源通过输出镜正入射到短脉冲激光器 1 中,通过理论详细计算讨论短脉冲激光器 2 工作在不同参数下对短脉冲激光器 1 的影响,同时通过一系列实验来验证理论模拟结果,通过理论模拟及实验验证,很好的解释了在工作中遇到的短脉冲调 Q 激光器失稳现象。

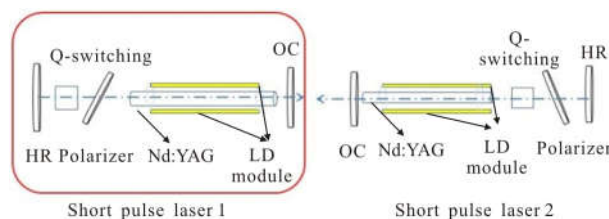


图 1 短脉冲激光干扰短脉冲激光器实验装置图

Fig.1 Short pulse laser interference short pulse laser device

短脉冲激光器 1 中 Nd:YAG 泵浦脉宽为 200  $\mu$ s,通过调 Q 可实现最大能量为 350 mJ、脉宽为 9.8 ns 的短脉冲激光输出。短脉冲激光器 2 通过调节泵浦模块控制电源参数,可输出能量分别为 1~10、30、60 mJ、脉宽为 10 ns 的短脉冲激光。

在干扰脉冲进入短脉冲激光器 1 之前,调 Q 开关关闭,短脉冲激光器 1 进行能量积累,增益介质上能级快速积累大量反转粒子数,此时将干扰光由短脉冲激光器 1 的输出镜处导入,干扰脉冲会大量消耗储存于短脉冲激光器 1 中增益介质上能级所存储的能量,消耗短脉冲激光器 1 中上能级反转粒子数。短脉冲激光器 1 中增益介质为 Nd:YAG 晶体,因晶体的荧光寿命远长于短脉冲激光器 2 输出光束的脉冲宽度,光泵浦来不及补充反转粒子数,这些反转粒子数是干扰光进行受激辐射而消耗的,由于时间太

短的缘故,腔内光子数密度和反转粒子数密度都不能达到稳定状态,因此可用空间和时间的函数来表示二者, $\varphi(x,t)$ 表示腔内光子数密度和 $n(x,t)$ 表示反转粒子数密度,干扰光信号所能消耗的能量取决于输入之前存储在短脉冲激光器工作物质中的能量。当输入脉冲通过短脉冲激光器时,原子受到激励释放出存储的能量,干扰过程可以用速率方程来说明,如果忽略荧光和泵浦在脉冲持续时间内的影响,则反转粒子数为:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\gamma n c \sigma \varphi \quad (1)$$

式中: $\gamma$ 为经典阻尼系数,其值取 1; $c$ 为激光脉冲光速; $\sigma$ 为短脉冲激光器增益介质发射截面积; $t$ 为短脉冲激光器 1 工作时间。当干扰脉冲通过具有反转粒子数的介质时,可以用下述与时间有关的非线性光子传输方程来描述其增大。

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = n c \sigma \varphi - \frac{\partial \varphi}{\partial x} c \quad (2)$$

在小体积介质中,光子密度的变化量等于受激辐射过程产生的光子数和从该体积射出的光子通量之差,公式(2)右边的第二项描述的后一过程。

考察单色光入射到长度 1 的短脉冲激光器 1 晶体棒的前表面的一维情况,将光束射入增益介质的点定位参照点,即 $x=0$ ;为得出短脉冲激光器中反转粒子数 $n$ 和光子通量 $\varphi$ ,必须解出公式(1)、(2)。Frantz、Nodvik 和其他人士针对多种输出脉冲的情况解出了这些非线性方程。如果输入到短脉冲激光器中的是巨型脉冲,其持续时间为 $t_p$ ,初始光子密度为 $\varphi_0$ ,则短脉冲激光器中光子密度的解为:

$$\frac{\varphi(x,t)}{\varphi_0} \left\{ 1 - [1 - \exp(\sigma n x)] \exp \left[ -\gamma \sigma \varphi_0 \left( c \left( t - \frac{x}{c} \right) \right) \right] \right\}^{-1} \quad (3)$$

式中: $n$ 为反转粒子数密度,设 $t=0$ 时,材料内的 $n$ 是均匀的。当干扰光束通过长度为 $x=1$ 的短脉冲激光器时,干扰光束的能量增益为:

$$G = \frac{1}{\varphi_0 t_p} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(1,t) dt \quad (4)$$

式中: $t_p$ 为干扰光的脉冲宽度,其值为 10ns。将公式(4)变形,使其包含可以直接测量的激光参量,单位面积的输入能量可表示为:

$$E_{in} = c \varphi_0 t_p h \nu \quad (5)$$

式中: $\varphi_0$ 为入射到短脉冲激光器 1 上的光子数密度;

$h\nu$ 为单个光子能量。可将饱和能量密度 $E_s$ 定义为:

$$E_s = \frac{h\nu}{\sigma \gamma} = \frac{E_{st}}{\gamma g_0} \quad (6)$$

式中: $E_{st}=h\nu n$ ,表示单位体积存储的能量; $g_0=n\sigma$ 表示小信号的增益系数。

在四能级系统中,短脉冲激光器单位体积的总储能为 $E_{st}=g_0 E_s$ 。能量提取效率 $\eta_E$ 表示从短脉冲激光器提取的能量与脉冲到达时短脉冲激光器上激光能级存储的能量之商,即:

$$\eta_E = \frac{E_{out} - E_{in}}{g_0 E_s} \quad (7)$$

式中: $E_{out}$ 和 $E_{in}$ 分别表示短脉冲激光器的辐射输出与干扰脉冲输入的能量密度。将公式(5)、(6)代入公式(4),得:

$$G = \frac{E_s}{E_{in}} \ln \left\{ 1 + \left[ \exp \left( \frac{E_{in}}{E_s} \right) - 1 \right] G_0 \right\} \quad (8)$$

公式(8)表示了增益 $G$ 、输入脉冲的能量密度 $E_{in}$ 、饱和能量密度 $E_s$ 和小信号单程增益 $G_0=\exp(g_0 l)$ 之间的关系。公式(8)适用于矩形输入脉冲,从干扰小信号增益到短脉冲激光器 1 完全饱和,它都是有效的,同时,小信号增益系数 $g_0=n\sigma_{21}$ 通常表示为 $g_0=E_{st}\beta$ , $E_{st}$ 为短脉冲激光器单位体积的储能, $\beta$ 为增益与储能关系式的参变量(对于 Nd:YAG,依据晶体特性可以得出 $\beta=4.73 \text{ cm}^2/\text{J}$ )<sup>[15]</sup>。

通过 $G$ 可以得出干扰光在经过短脉冲激光器 1 后的增益,进而得出在短脉冲激光器中提取的能量即短脉冲激光器 1 被消耗的存储能量,干扰光通过短脉冲激光器的时间极短,在整个泵浦阶段可以忽略,在经过这一过程后,短脉冲激光器 1 继续进行上能级粒子数的积累,继续进行能量存储,通过计算可以得出在调 Q 开关打开前所能积累的上能级粒子数,从而得出调 Q 开关打开后短脉冲激光器 1 所能输出光束的能量和脉宽。在不同时间节点注入不同能量的干扰短脉冲,模拟计算被干扰激光器的最终输出激光光束的能量和脉冲宽度随注入时间时刻变化曲线,如图 2、3 所示。

由图 2、3 可以看出,在 $t=100 \mu\text{s}$ 时,注入能量为 30mJ 的干扰脉冲,短脉冲激光器的输出能量由 111mJ 下降至 82mJ,脉宽由 8.1ns 展宽至 11.5ns;注入能量为 60mJ 的干扰脉冲,短脉冲激光器的输出能量由 111mJ 下降至 76mJ,脉宽由 8.1ns 展宽至 12.2ns。

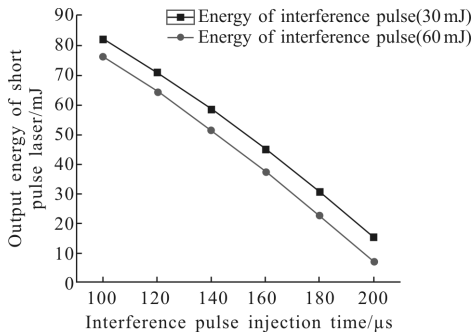


图 2 短脉冲干扰时被干扰激光器输出脉冲能量

Fig.2 Output pulse energy of interfered laser with short pulse

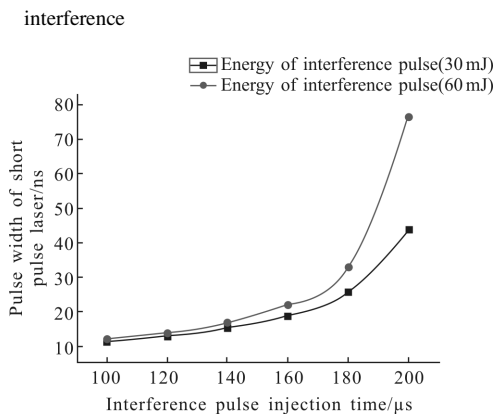


图 3 短脉冲干扰时被干扰激光器输出脉冲脉宽

Fig.3 Output pulse width of interfered laser with short pulse interference

干扰脉冲注入时间相同时, 干扰脉冲的能量越大, 对短脉冲激光器能量损失越大, 脉宽展宽也越宽, 由此导致的失稳现象越严重。从图 4、5 可以看

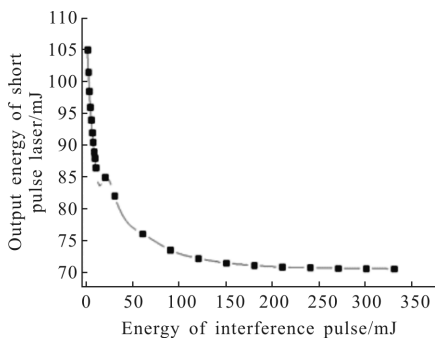


图 4 被干扰激光器输出脉冲能量 ( $t=100 \mu\text{s}$ )

Fig.4 Output pulse energy of interfered laser ( $t=100 \mu\text{s}$ )

出, 在  $t=100 \mu\text{s}$  时注入干扰脉冲, 其中干扰脉冲能量为短脉冲激光器可输出能量的 1%~10% 时, 短脉冲激光器可输出能量快速下降, 由可输出能量的

94.5% 降至 78%, 脉宽迅速展宽。在干扰脉冲能量为 10~330 mJ 时, 短脉冲激光器可输出能量缓慢下降, 由可输出能量的 78% 降至 63%, 脉宽展宽速率降低, 这一现象也可由固体激光放大器中的 ASE 效应解释。在干扰脉冲的能量不变时, 注入的时间节点越靠后, 造成的失稳现象越严重, 在短脉冲泵浦脉宽的后期注入干扰脉冲, 可能直接导致短脉冲激光器输出能量很小, 甚至无法出光。

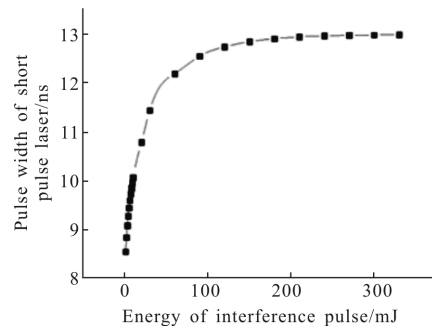


图 5 被干扰激光器输出脉冲脉宽 ( $t=100 \mu\text{s}$ )

Fig.5 Output pulse width of interfered laser ( $t=100 \mu\text{s}$ )

## 2 实验验证

采用自行研制的风冷式半导体泵浦的固体激光器作为被干扰激光器<sup>[15]</sup>, 激光器输出脉宽为 9.8 ns, 最大输出能量为 350 mJ, 激光器的泵浦脉宽为 200  $\mu\text{s}$ , 实验中在电流为 60 A 时, 可输出 9.8 ns、100 mJ 的激光脉冲, 如图 6 所示。采用风冷式半导体泵浦的固体激光器作为干扰源, 激光器输出脉宽为 10 ns, 最大输出能量为 100 mJ, 通过调节泵浦电源电流, 取 30 mJ、10 ns 和 60 mJ、10 ns 两组参量, 如图 7 所示。

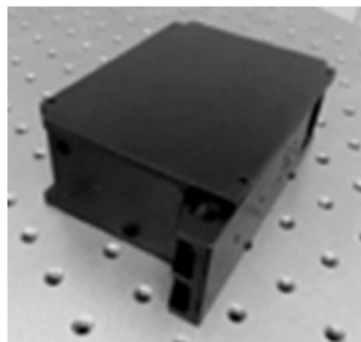


图 6 短脉冲激光器 1 实物图

Fig.6 Physical drawing of short pulse laser 1

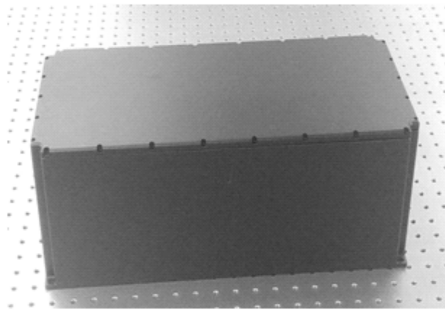


图 7 短脉冲激光器 2 实物图

Fig.7 Physical drawing of short pulse laser 2

将短脉冲激光器 1 的出光口与短脉冲激光器 2 的出光口位置对齐, 确保干扰脉冲能够正入射进短脉冲激光器 1。两台激光器驱动电源采用一台控制器进行外控, 控制器可对激光器 2 进行出光时间控制, 延迟精度可达  $1 \mu\text{s}$ 。

短脉冲激光器 1 的泵浦脉宽为  $200 \mu\text{s}$ , 干扰脉冲是在短脉冲激光器 1 泵浦阶段注入的, 如图 8 所示, 干扰脉冲带走短脉冲激光器 1 所储存的能量后, 短脉冲激光器会继续进行泵浦积累。在  $200 \mu\text{s}$  时, Q 开关打开, 其中  $t$  的取值为  $100 \sim 200 \mu\text{s}$ 。最终得到短脉冲激光器 1 输出光束的能量及脉宽随电流变化曲线如图 9、10 所示。

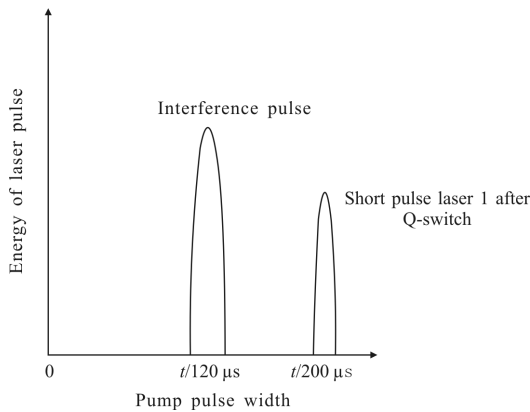


图 8 干扰脉冲注入时间说明

Fig.8 Description of interference pulse injection time

不同注入时间节点、注入不同能量干扰光时短脉冲激光器的输出特性进行测量, 可以发现失稳现象明显。通过图 9、10 可以看出: (1) 在干扰光能量为  $30 \text{ mJ}$ , 注入时间为  $100 \mu\text{s}$  时, 短脉冲可输出能量损失  $10\%$ , 脉宽展宽至  $1.1$  倍。干扰光脉冲能量越大, 在短脉冲激光器中提取能量越多, 导致短脉冲激

光器输出能量降低; (2) 在干扰光能量为  $30 \text{ mJ}$ , 注入时间为  $180 \mu\text{s}$  时, 短脉冲可输出能量损失  $60\%$ , 脉宽展宽至  $22$  倍。干扰光注入时间越靠后, 即留给短脉冲激光器重新进行泵浦累积的时间越短, 失稳现象越明显。

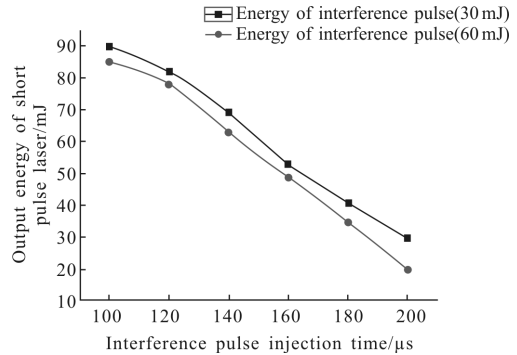


图 9 短脉冲干扰时被干扰激光器输出脉冲能量

Fig.9 Output pulse energy of interfered laser with short pulse

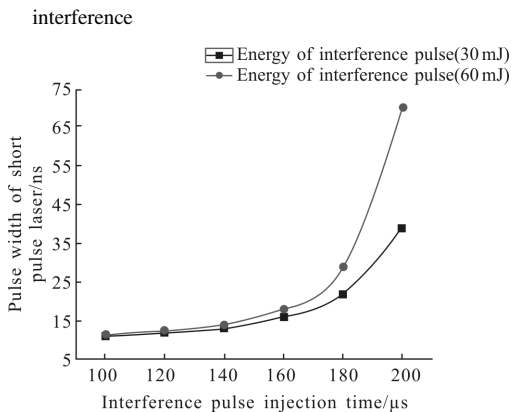


图 10 短脉冲干扰时被干扰激光器输出脉冲脉宽

Fig.10 Output pulse width of interfered laser with short pulse interference

### 3 结论

系统全面的从理论与实验两方面分析, 探究了短脉冲激光器干扰光造成的失稳现象。通过建立模型进行计算, 分析了 Nd:YAG 短脉冲激光器失稳现象的具体特性。在注入干扰脉冲能量为  $30 \text{ mJ}$ , 注入时间为  $100 \mu\text{s}$  时, 短脉冲可输出能量损失  $10\%$ , 脉宽展宽至  $1.1$  倍。并且干扰光脉冲能量越大, 在短脉冲激光器中提取能量越多, 导致短脉冲激光器输出能量降低更严重, 脉宽展宽越大。在干扰光能量为  $30 \text{ mJ}$ , 注入时间为  $180 \mu\text{s}$  时, 短脉冲可输出能量损失  $60\%$ , 脉宽展宽至  $22$  倍, 随着注入时间节点的推

后,失稳现象趋于严重,并且在调 Q 开关打开前注入干扰脉冲时,可能会导致被干扰激光器无法出光。因干扰脉冲注入时间的不同,对短脉冲造成的影响也会有很大差异,综合多方面考虑,当干扰脉冲的能量大于短脉冲激光器可输出能量的 10% 时,才可有较为明显的干扰效果。文中通过实验对这一结论进行了验证,该结论可用于 Nd:YAG 固体激光器的设计及应用。在实验过程中由于结构的散热因素等,实际失稳现象会略有偏差。此外干扰光与短脉冲激光器光路会有一定偏离,这会直接导致可进入短脉冲激光器的干扰光能量降低,今后将通过进一步优化改进得到更好的结果来进行分析。

### 参考文献:

- [1] Ma Y, Li X, Yu X, et al. High-repetition-rate and short-pulse width electro-optical cavity-dumped  $\text{YVO}_4/\text{Nd}:\text{GdVO}_4$  laser[J]. *Appl Opt*, 2014, 53(14): 3081–3084.
- [2] Dong Xiaolong, Gao LanLan, Zhang Fan, et al. Simulation of actively Q-switched pulse parameters in Nd:YVO<sub>4</sub> and Nd:YAG [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 1986–1990. (in Chinese)
- [3] Ma Yufei, Li Xudong, Yu Xin, et al. High-repetition-rate and short-pulse-width electro-optical cavity-dumped  $\text{YVO}_4/\text{Nd}:\text{GdVO}_4$  laser [J]. *Applied Optics*, 2014, 53 (14): 3081–3084. (in Chinese)
- [4] Li Lei, Wang Jianlei, Cheng Xiaojing, et al. Cryogenic Yb:YAG solid state pulsed laser amplifier [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(5): 1170–1173. (in Chinese)  
李磊, 王建磊, 程小劲, 等. 低温重复率 Yb:YAG 固体激光放大器[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(5): 1170–1173.
- [5] Liu Xuesheng, Xia Jiaozhen, Yan Xin, et al. High peak power lamp-pumped pulsed Nd:YAG solid-state laser with one cavity [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35 (9): 1313–1317. (in Chinese)  
刘学胜, 夏皎贞, 鄢歆, 等. 单级静态高峰值功率灯抽运脉冲 Nd:YAG 固体激光器[J]. *中国激光*, 2008, 35(9):1313–1317.
- [6] Dong Jian, Liu Xuesheng, Si Hanying, et al. 350 mJ LD side pumped Q-switched Nd:YAG laser without water cooling[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43 (11): 1101005. (in Chinese)
- [7] Mao Xiaojie. New progress in high-power picosecond ultraviolet laser [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8 (2): 182–190. (in Chinese)
- [8] Zhao Yuan'an, Hu Guoxing, Liu Xiaofeng, et al. Laser conditioning technology and its applications [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(12): 2938–2947. (in Chinese)
- [9] David H, Sang-GIL R, Nipun M, et al. Nanoscale laser processing and diagnostics[J]. *Applied Physics*, 2009, 96(2): 289–306.
- [10] Chen Jia, Shao Ruoyan, Cui Xinqiang, et al. Spectra of high power pulsed xenon lamp tubes and their impact resistances [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(12): 2988–2992. (in Chinese)
- [11] Meng Peibei, Shi Wenzong, Yan Fanjiang, et al. Influence of resonator misalignment on performance of diode-pumped Nd:YAG laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46 (6): 0605001. (in Chinese)
- [12] Pan Qikun. Progress of mid-infrared solid-state laser [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4): 557–566. (in Chinese)
- [13] Dong J, Liu X S, Peng C, et al. High power diode-side-pumped Q-switched Nd:YAG solid-state laser with a thermoelectric[J]. *Applied Sciences-Basel*, 2015, 5(4): 1837–1845.
- [14] Luo X, Wang P F, Li J X, et al. Anti-detuning laser with high optical axis atability [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 56: 091401.
- [15] Koehnner W. Solid State Laser Engineering [M]. Translated by Sun Wen. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)