

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.05.018

被动调 Q 固体激光器非线性动力学研究

高子叶^{1,2}, 夏光琼¹, 邓涛¹, 林晓东¹,
唐曦¹, 樊利³, 吴正茂^{1,2}

1. 西南大学 物理科学与技术学院, 重庆 400715; 2. 西南大学 数学与统计学院, 重庆 400715;
3. 西南大学 电子信息工程学院, 重庆 400715

摘要: 被动调 Q 固体激光器具有结构紧凑、效率高和光束质量优异等特点, 因此在基础科学研究、军事、工业加工、医疗卫生等众多领域具有广阔的应用前景。目前, 相关研究主要集中在处于单周期动力学态下激光器的特性, 而对于处于其他非线性动力学态下激光器特性的研究十分缺乏, 尤其是进入混沌的分岔路径还未见报道。该研究基于四能级系统速率方程, 数值研究了被动调 Q Nd: YAG 固体激光器的非线性动力学特性, 并分析了一些关键系统参量的影响。结果表明: 在不同的参数下, 被动调 Q 固体激光器可呈现单周期、倍周期、多周期以及脉冲混沌等多种动力学态; 连续变化参量数值, 动力学态呈现多种演化路径; 数值模拟结果再现了工作在脉冲混沌态的被动调 Q 固体激光器中出现的极端事件。

关键词: 被动调 Q 固体激光器; 非线性动力学;
脉冲混沌; 演化路径; 极端事件

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2023)05-0195-09

Nonlinear Dynamics of a Passively Q-Switched Solid-State Laser

GAO Ziye^{1,2}, XIA Guangqiong¹, DENG Tao¹,
LIN Xiaodong¹, TANG Xi¹, FAN Li³, WU Zhengmao^{1,2}

1. School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. School of Mathematics and Statistic, Southwest University, Chongqing 400715, China;

3. School of Electronic and Information Engineering, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Due to many advantages of compact structure, high efficiency, excellent beam quality, etc., passively Q-switched solid-state lasers have a bright future in basic scientific research, military, industrial processing, medical hygiene and many other fields. At present, the related reports mainly focused on the characteristics of passively Q-switched solid-state lasers operating at the period-one dynamic state. However,

收稿日期: 2021-09-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(61875167, 61805205); 中国博士后面上项目(2018M633303); 重庆市博士后特别项目(XmT2018044); 重庆市自然科学基金项目(CSTC2019jcyj-msxmX0136); 中央高校基本科研业务费专项(JC2015); 西南大学博士基金项目(SWU120017)。

作者简介: 高子叶, 博士, 副教授, 主要从事全固态超快激光器的产生及应用的研究。

通信作者: 吴正茂, 博士, 教授, 博士研究生导师。

er, there were few reports about the characteristics of passively Q-switched solid-state lasers at other non-linear dynamic states. Especially, the bifurcation into pulse chaos has not been reported. In this work, based on the rate equations, the nonlinear dynamics of a passively Q-switched solid-state Nd: YAG lasers was numerically investigated. The effects of key parameters including the pumping rate, the intracavity round-trip optical loss and the intracavity optical round-trip time on the nonlinear dynamics were analyzed. The simulated results indicate that: through setting different values of key parameters, the passively Q-switched solid-state laser can exhibit various dynamic states, such as period-one, period-two, multi-period and pulse chaos states. When continuously changing one of the key parameters, the dynamic states of passively Q-switched solid-state laser present a variety of evolution paths. In addition, the numerical simulation results show that there are extreme events in passively Q-switched solid-state laser operating at the pulse chaos state.

Key words: passively Q-switched solid-state laser; nonlinear dynamics; pulse chaos; evolution path; extreme events

被动调 Q 固体激光器具有结构紧凑、效率高、光束质量优异、脉宽窄和峰值功率高等优点, 在基础科学研究、军事、工业加工和医疗卫生等众多领域有广泛的应用前景. 例如, 径向偏振调 Q 激光可用于各类金属的钻孔^[1]; 高峰值功率和功率密度的调 Q 激光可以用于激光诱导等离子体点火^[2]; 1 μm 波段的调 Q 激光可用于治疗痤疮和黄褐斑^[3]; 2.94 μm 的调 Q 激光可消融牙本质, 从而用于牙科治疗^[4]. 对于这些应用来说, 除了需要考虑调 Q 激光的波长范围、偏振特性、脉冲宽度、脉冲能量、脉冲峰值功率和重复频率等之外, 通常也要求调 Q 激光的脉冲峰值功率具有良好一致性(即脉冲峰值功率不随时间变化). 因此, 目前关于被动调 Q 固体激光器的研究主要集中在激光器处于单周期振荡动力学态. 而对于被动调 Q 固体激光器处于其他的非线性动力学态(即脉冲峰值功率随时间变化)的研究相对较少. 在特定工作参数条件下, 被动调 Q 固体激光器可呈现一种特殊的非线性动力学态——脉冲混沌态, 此时其输出脉冲的峰值功率将随时间呈现复杂的混沌变化趋势. 相对于其他的混沌源而言, 基于被动调 Q 固体激光器产生的脉冲混沌激光具有更高的峰值功率, 将其应用到混沌雷达领域有望大幅度提高混沌雷达的作用距离. 因此, 对被动调 Q 固体激光器非线性动力学特性进行深入研究具有重要意义.

2003 年, Tang 等^[5]实验观测到被动调 Q Nd: YAG 固体激光器表现出单周期、倍周期以及脉冲混沌动力学态, 并从速率方程出发数值模拟了不同泵浦速率下激光器对应呈现出的 3 种动力学态; Wei 等^[6]实验观察到在不同泵浦功率下, 被动调 Q Nd: YAG 固体激光器呈现出单周期、倍周期、多周期和脉冲混沌动力学态, 且处于不同动力学态时激光横模数目不同; Ng 等^[7]实验观察到通过调节谐振腔, 被动调 Q Nd: GdVO₄ 和 Nd: YVO₄ 激光器均可表现出单周期、倍周期、多周期和脉冲混沌动力学态; Wei 等^[8]实验观测到被动调 Q Nd: LuVO₄ 固体激光器也可以呈现出单周期、倍周期和脉冲混沌动力学态, 并且处于脉冲混沌动力学态时伴随着旁瓣脉冲的出现; Yao 等^[9]实验观察到在较高泵浦功率下, 被动调 Q Tm: YAP 固体激光器输出脉冲幅度变得混乱, 认为激光器进入了脉冲混沌动力学态; Kovalsky 等^[10]实验证明了被动调 Q Nd: YAG 固态激光器输出脉冲间距具有不稳定性, 并遵循确定性低维非线性动力学规律; Du 等^[11]实验研究了被动调 Q Tm, Ho: GdVO₄ 固体激光器输出脉冲具有不稳定性, 并将其归因于确定性低维非线性动力学引起的; Hong 等^[12]理论和实验研究了被动调 Q Nd: YVO₄ 固体激光器输出激光的脉冲宽度随外部泵浦调制频率的演化路径; Bonazzola 等^[13-14]研究了激光横模对被动调 Q 固体激光器非线性动力学态的影响, 并分析了极端事件(extreme events, EEs, 极端事件定义为脉冲峰值强度高于标准偏差的 4 倍)出现条件; Tsai 等^[15]实验观测到被动调 Q Nd: GdVO₄ 偏振固体激光器呈现出单周期和脉冲混沌动力学态; Han 等^[16-17]实验观测到被动调 Q Nd: Lu_{0.61}Gd_{0.39}VO₄ 固体激光器表现出单周期和多周期动力学态. 2021 年, 本课题组^[18]实验观测到高重频被动调 Q Nd: LaMgAl₁₁O₁₉ 固体激光器呈现出单周期和脉冲混沌动力学态, 并且分析了脉冲混沌激光的时间序列、频谱、相图、自相关曲线和直方图等. 上述报道针对被动调 Q

固体激光器的非线性动力学态开展了部分理论和实验研究, 但是激光器的非线性动力学态随着系统关键参量(如泵浦速率、腔内光子往返损耗、腔内光子往返时间等)变化的演化路径还未见报道.

基于此, 本研究从四能级系统速率方程出发, 利用四阶龙格-库塔法和自适应变步长法数值研究了被动调 Q Nd: YAG 固体激光器的非线性动力学特性, 分析了泵浦速率、腔内光子往返损耗、腔内光子往返时间等关键系统参量对被动调 Q Nd: YAG 固体激光器非线性动力学的影响. 数值模拟结果表明: 通过选取不同的关键参量数值, 被动调 Q 固体激光器可呈现单周期、倍周期、多周期以及脉冲混沌动力学态; 连续变化其中一个关键参量的数值, 激光器的动力学态既可呈现出经历单周期、倍周期、多周期, 再进入脉冲混沌的演化路径; 也呈现可经历脉冲混沌、多周期、倍周期, 再到单周期的演化路径. 此外, 数值模拟结果呈现了处于脉冲混沌动力学态的被动调 Q 固体激光器出现极端事件的情形.

1 理论模型

Nd: YAG 晶体具有优良的机械和光学性能, 是常用于实现脉冲宽度窄、峰值功率高、脉冲能量大的近红外调 Q 激光的固体增益介质之一^[19-22]. 在近红外被动调 Q 固体激光器中, Cr: YAG 晶体常作为可饱和吸收体使用. 因此, 本研究以 Nd: YAG 为激光增益介质, Cr: YAG 为可饱和吸收体, Nd: YAG/Cr: YAG 被动调 Q 固体激光器的四能级速率方程为^[5]:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\varphi}{t_r} \left[2\sigma_e l_g (n_2 - n_1) - 2\sigma_a l_s n_s - \left(\ln \frac{1}{R} + L \right) \right]$$

(1)

$$\frac{dn_2}{dt} = W_p n_0 - (\gamma_{20} + \gamma_{21}) n_2 - \sigma_e c \varphi (n_2 - n_1)$$

(2)

$$\frac{dn_1}{dt} = -\gamma_{10} n_1 + \gamma_{21} n_2 + \sigma_e c \varphi (n_2 - n_1)$$

(3)

$$\frac{dn_0}{dt} = \gamma_{20} n_2 + \gamma_{10} n_1 - W_p n_0$$

(4)

$$\frac{dn_s}{dt} = \gamma_s (n_{s0} - n_s) - \sigma_a c \varphi n_s$$

(5)

其中, φ 为腔内光子数密度; n_2, n_1, n_0 分别为 Nd: YAG 的上能级粒子数密度、下能级粒子数密度和基态粒子数密度, 并且满足 $n_0 + n_1 + n_2 = 1.52 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$; n_s 和 n_{s0} 分别为 Cr: YAG 的基态粒子数密度和初始粒子数密度; σ_e 为 Nd: YAG 的受激发射截面; σ_a 为 Cr: YAG 的吸收截面; $\gamma_{21}, \gamma_{20}, \gamma_{10}$ 分别为 Nd: YAG 上能级到下能级的衰减速率、上能级到基态的衰减速率、下能级到基态的衰减速率; γ_s 为 Cr: YAG 基态的衰减速率; l_g 为 Nd: YAG 的通光长度; l_s 为 Cr: YAG 的通光长度; c 为光速; R 为输出镜的反射率; L 为腔内光子往返损耗; t_r 为腔内光子往返时间; W_p 为泵浦速率. 采用四阶龙格-库塔法和自适应变步长法求解微分方程, 仿真参数见表 1^[5].

表 1 仿真参数

符号	含义及单位	数值
n_{s0}	Cr: YAG 的初始粒子数密度/ cm^{-3}	4.5×10^{17}
σ_e	Nd: YAG 的受激发射截面/ cm^2	6.6×10^{-19}
σ_a	Cr: YAG 的吸收截面/ cm^2	4.3×10^{-18}
γ_{21}	Nd: YAG 上能级到下能级的衰减速率/ s^{-1}	1.8×10^3
γ_{20}	Nd: YAG 上能级到基态的衰减速率/ s^{-1}	2.53×10^3
γ_{10}	Nd: YAG 下能级到基态的衰减速率/ s^{-1}	3.33×10^7
γ_s	Cr: YAG 基态的衰减速率/ s^{-1}	3.125×10^5
l_g	Nd: YAG 的通光长度/mm	8
c	光速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	3×10^8
R	输出镜的反射率/%	80

2 结果与分析

2.1 泵浦速率对被动调 Q 激光非线性动力学的影响

通常对于被动调 Q 固体激光器来说,当增益介质和可饱和吸收体的种类和通光长度固定后,泵浦速率、腔内光子往返损耗、腔内光子往返时间是影响被动调 Q 固体激光器非线性动力学的关键系统参量.为了研究泵浦速率对被动调 Q 固体激光器非线性动力学的影响,将腔内光子往返损耗和腔内光子往返时间固定并分别设置为 0.04 和 800 ps.图 1 和图 2 分别为在不同泵浦速率下,调 Q 激光的时间序列和相图.图 1 为时间序列,即调 Q 激光的强度随时间的变化趋势图;图 2 为相图,即调 Q 激光的脉冲峰值功率($n+1$)随脉冲峰值功率(n)的变化趋势图.图 1a 和图 2a 是泵浦速率为 $600.022\ 500\ \text{s}^{-1}$ 的时间序列和相图,从时间序列图中可以看出调 Q 激光峰值功率具有恒定强度,同时相图中只有一个点,表明系统处于单周期态.图 1b 和图 2b 是泵浦速率为 $600.022\ 550\ \text{s}^{-1}$ 的时间序列和相图,从时间序列图中可以看到调 Q 激光峰值功率具有 2 个数值并交替出现,同时相图中出现了 2 个点,表明系统处于倍周期态.图 1c 和图 2c 是泵浦速率为 $600.022\ 590\ \text{s}^{-1}$ 的时间序列和相图,从时间序列图中可以看到调 Q 激光峰值功率具有 4 个数值并周期出现,同时相图中出现了 4 个点,表明系统处于四周期态.图 1d 和图 2d 是泵浦速率为 $600.022\ 650\ \text{s}^{-1}$ 的时间序列和相图,从时间序列图中可以看到调 Q 激光峰值功率具有多个数值且无规律,同时相图中出现了一条线^[23],表明系统处于脉冲混沌态.

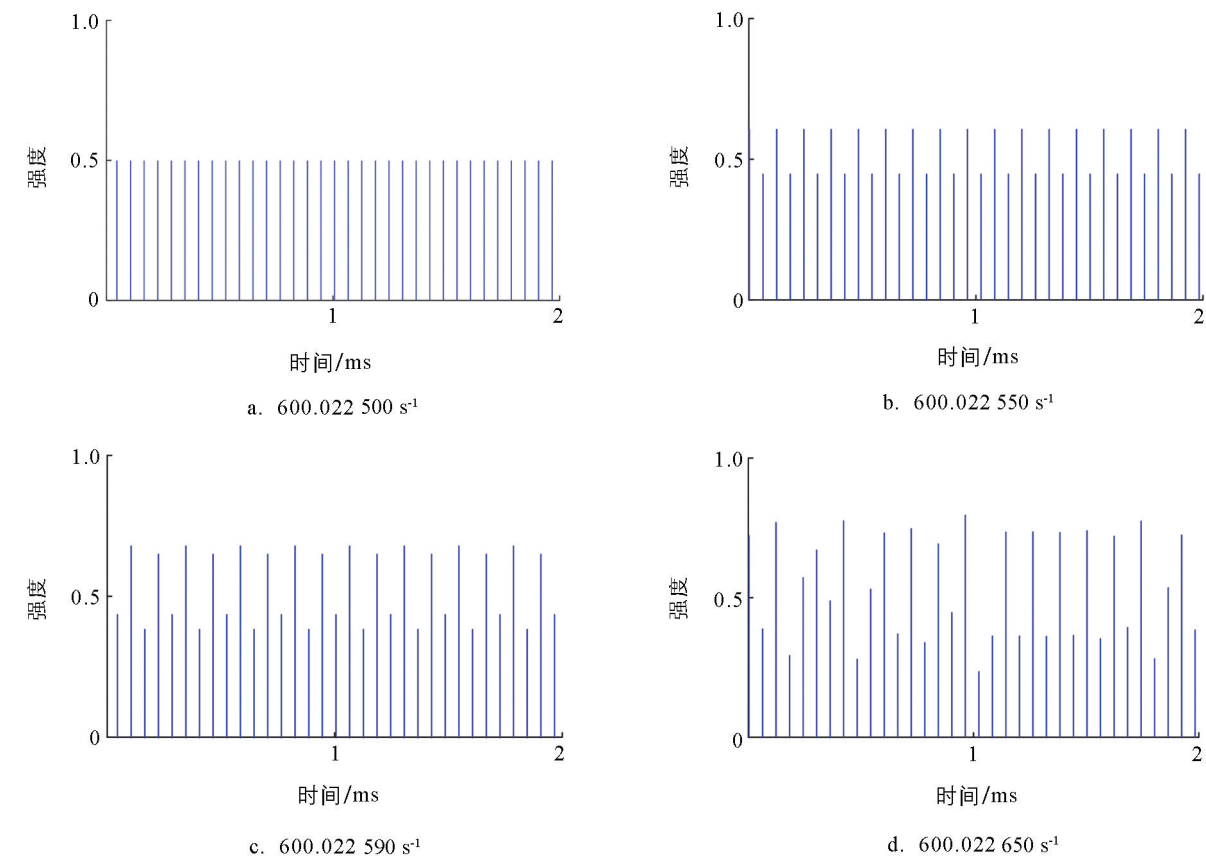


图 1 不同泵浦速率下,被动调 Q 激光的时间序列

为了进一步研究激光器动力学态的演化路径,数值模拟了调 Q 激光的脉冲峰值功率随泵浦速率变化的分岔图(图 3).图 3a 是泵浦速率从 $600.022\ 500\ \text{s}^{-1}$ 到 $600.022\ 700\ \text{s}^{-1}$ 变化时,激光器的动力学状态历经单周期、倍周期、多周期,然后进入脉冲混沌态,表明系统是经倍周期分岔路径进入脉冲混沌.图 3a 中黑色虚线右侧调 Q 激光的脉冲峰值功率表现出无界性,此时调 Q 激光部分峰值功率会出现一些较高的数值,表明此时出现了极端事件^[13].图 3b 是泵浦速率从 $609.100\ 365\ \text{s}^{-1}$ 到 $609.100\ 455\ \text{s}^{-1}$ 变化时,激光器的动力学态呈现出由脉冲混沌态到单周期态的演化路径.图 3b 中黑色虚线左侧部分表明调 Q 激光处于脉冲混沌态时也出现了极端事件.

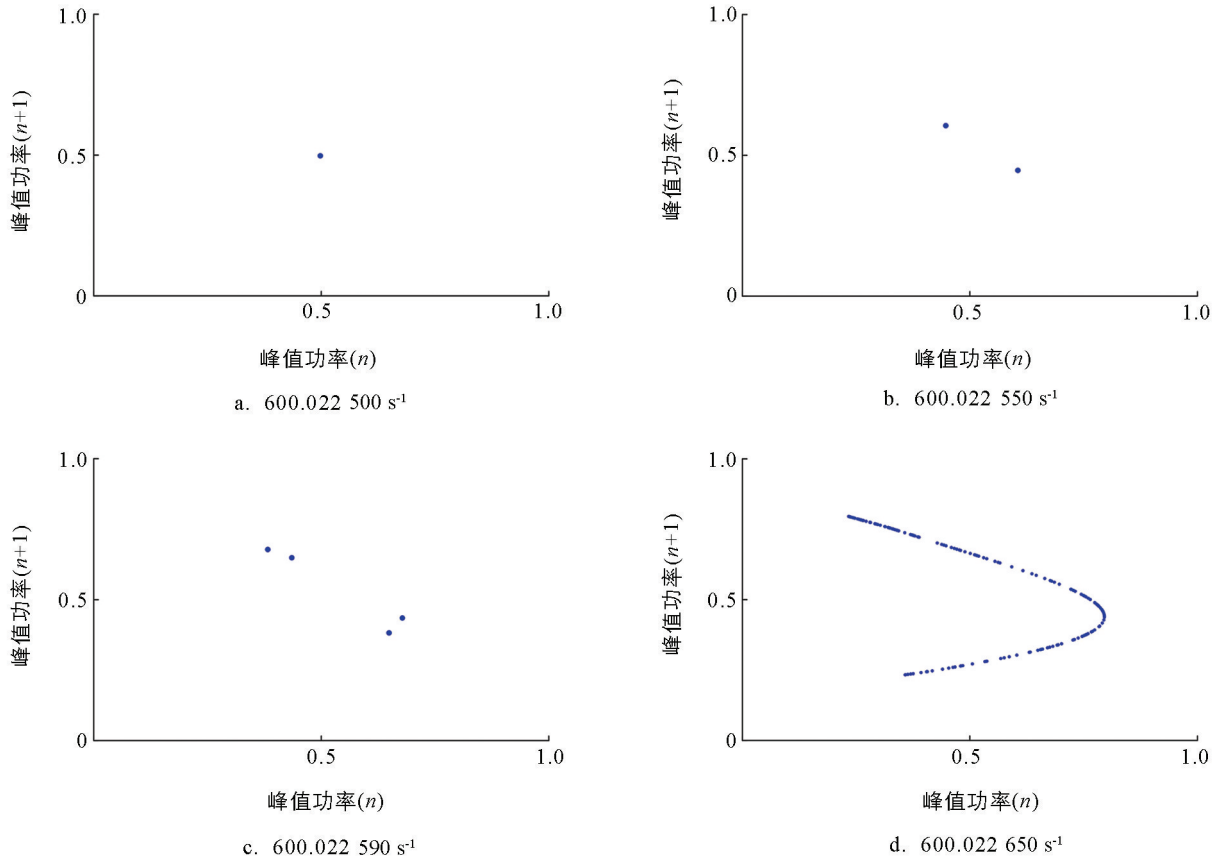


图 2 不同泵浦速率下，被动调 Q 激光的相图

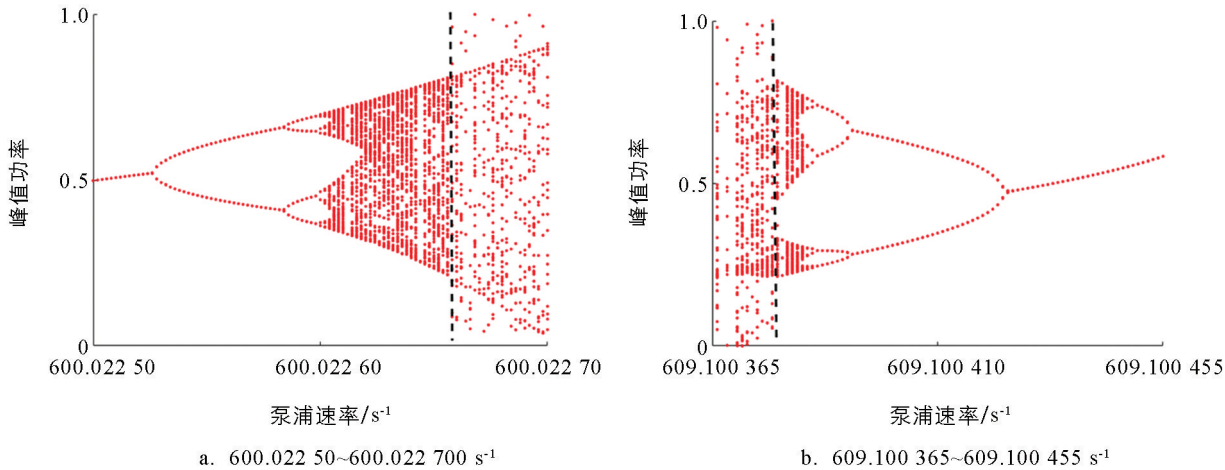


图 3 调 Q 激光峰值功率随泵浦速率变化的分岔图

2.2 腔内光子往返损耗对被动调 Q 激光非线性动力学的影响

通常对于被动调 Q 激光器来说，腔损耗主要包括了耦合损耗(输出镜反射率)、随机损耗(散射、衍射和吸收等)以及可饱和吸收体的残余吸收损耗等。耦合损耗是输出镜引入的损耗；随机损耗是光子在腔内往返过程中由于散射、衍射和吸收等引入的损耗；可饱和吸收体的残余吸收损耗主要取决于可饱和吸收体的初始透射率。当输出镜以及可饱和吸收体的参数固定时，通过调节谐振腔腔镜的倾角可改变随机损耗，可以控制输出激光的非线性动力学态。基于此，对腔内光子往返损耗对被动调 Q 激光非线性动力学的影响开展了研究。本研究中的腔内光子往返损耗(L)是指随机损耗。为了研究腔内光子往返损耗对被动调 Q 激光非线性动力学的影响，将泵浦速率和腔内光子往返时间分别设置为 600 s^{-1} 和 800 ps 。图 4 和图 5 分别为在不同腔内光子往返损耗下，调 Q 激光的时间序列和相图。当腔内光子往返损耗为 $0.048\ 84, 0.048\ 86, 0.048\ 87, 0.048\ 88$ 时，调 Q 激光的时间序列和相图如图 4a 和图 5a、图 4b 和图 5b、图 4c 和图 5c、图 4d 和图 5d 所示，表明调 Q 激光工作在单周期、倍周期、多周期和脉冲混沌态。

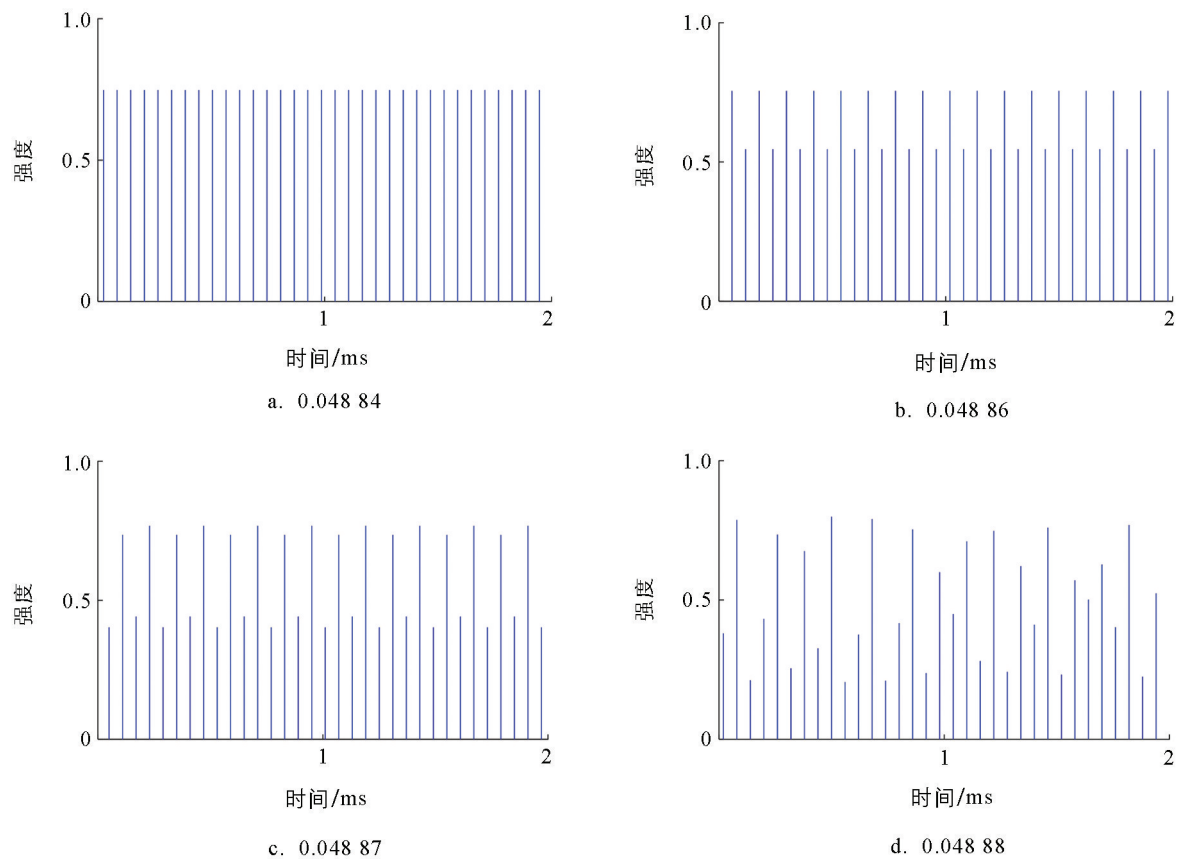


图 4 在不同腔内光子往返损耗下, 被动调 Q 激光的时间序列

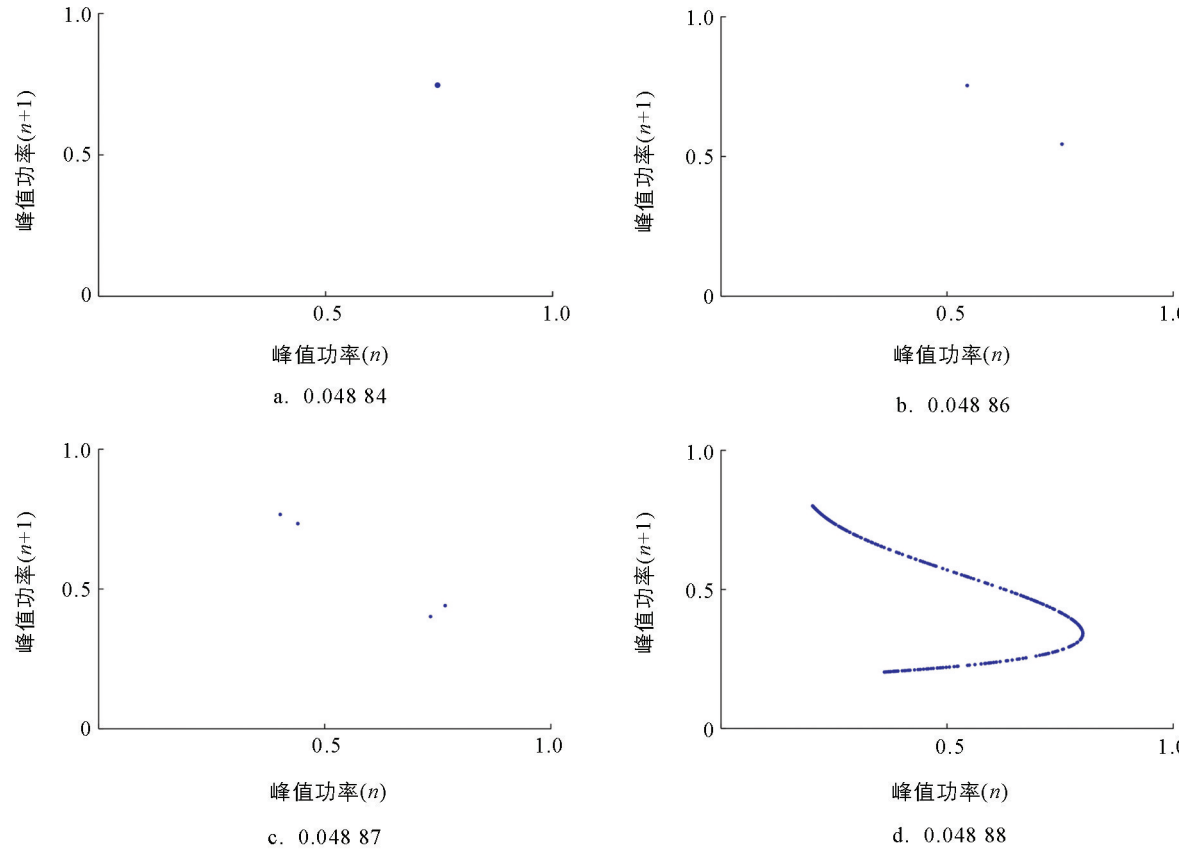


图 5 在不同腔内光子往返损耗下, 被动调 Q 激光的相图

为了进一步分析激光器动力学状态的演化路径, 数值模拟了调 Q 激光峰值功率随腔内光子往返损耗变化的分岔图(图 6). 图 6a 是腔内光子往返损耗从 0.036 43 到 0.036 51 变化时, 激光器呈现出从脉冲混沌态到单周期态的演化路径; 图 6b 是腔内光子往返损耗从 0.048 83 到 0.048 91 变化时, 激光器呈现出由单周期态进入脉冲混沌态的倍周期分岔路径. 另外, 图 6a 和图 6b 中黑色虚线左侧和右侧部分也出现了极端事件.

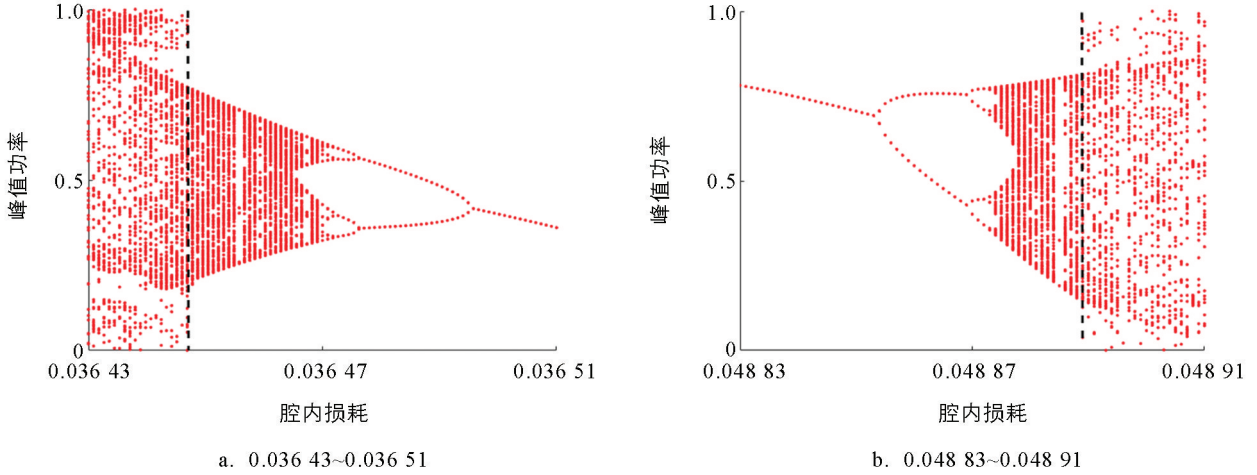


图 6 调 Q 激光峰值功率随腔内光子往返损耗变化的分岔图

2.3 腔内光子往返时间对被动调 Q 激光非线性动力学的影响

对于被动调 Q 固体激光器来说, 增益介质、可饱和吸收体、谐振腔的长度共同决定了腔内光子往返时间. 当增益介质和可饱和吸收体的长度固定时, 通过调节谐振腔的长度可调节腔内光子往返时间. 为了数值模拟腔内光子往返损耗对被动调 Q 激光非线性动力学的影响, 将泵浦速率和腔内往返损耗分别设置为 600 s^{-1} 和 0.04. 图 7 和图 8 是在不同腔内光子往返时间下, 调 Q 激光的时间序列和相图. 当腔内光子往返时间为 800.772 000, 800.771 000, 800.770 940, 800.770 820 ps 时, 调 Q 激光的时间序列和相图见图 7 和图 8, 说明被动调 Q 激光器的动力学状态呈现为单周期、倍周期、多周期以及脉冲混沌态.

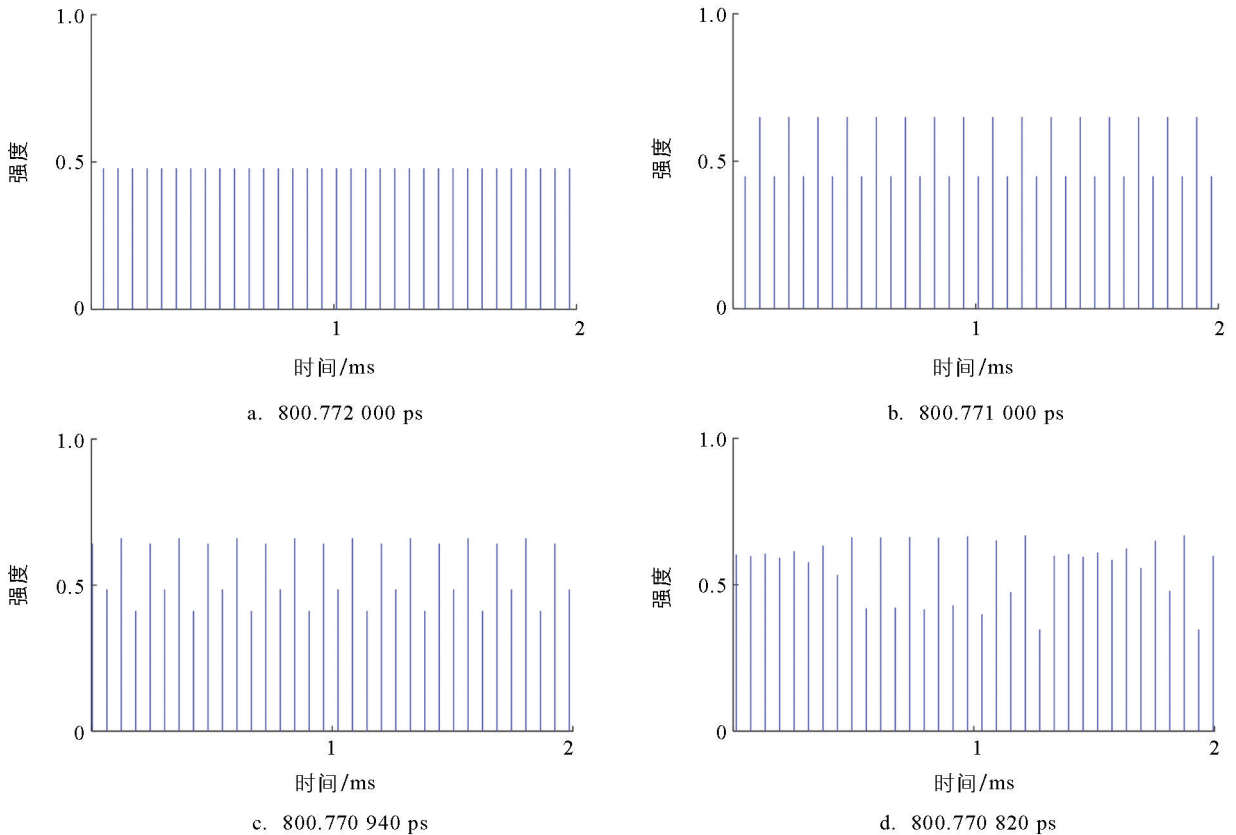


图 7 不同腔内光子往返时间下, 被动调 Q 激光的时间序列

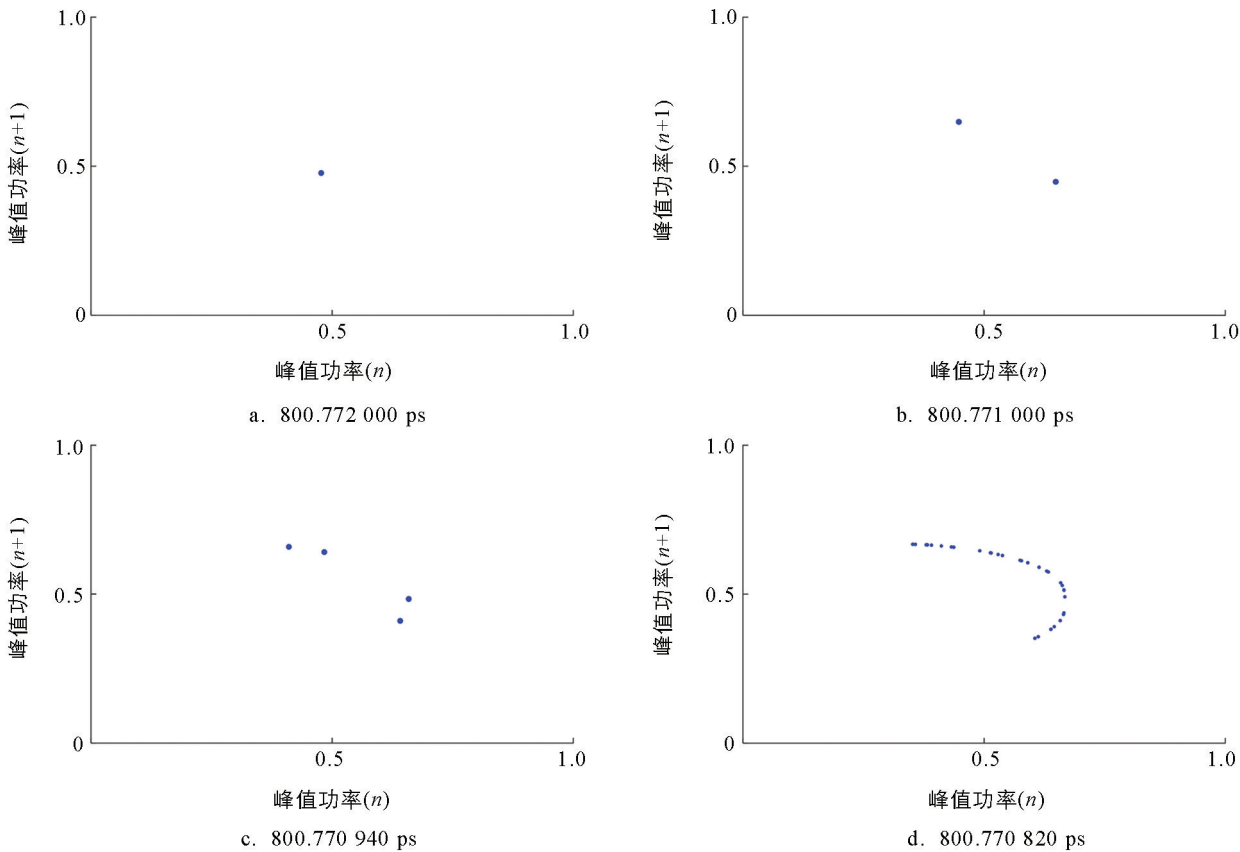


图 8 不同腔内光子往返时间下，被动调 Q 激光的相图

为了进一步研究腔内光子往返时间对被动调 Q 激光器非线性动力学的影响，本研究数值模拟了调 Q 激光峰值功率随腔内光子往返时间的演化路径(图 9)。图 9a 和图 9b 是腔内光子往返时间在 799.567 300~799.567 700,800.770 700~800.772 100 ps 范围内，激光器表现出单周期态进入脉冲混沌态的倍周期分岔路径以及由脉冲混沌态到单周期态的演化路径。图 9a 黑色虚线右侧部分和图 9b 黑色虚线左侧部分表明出现了极端事件。

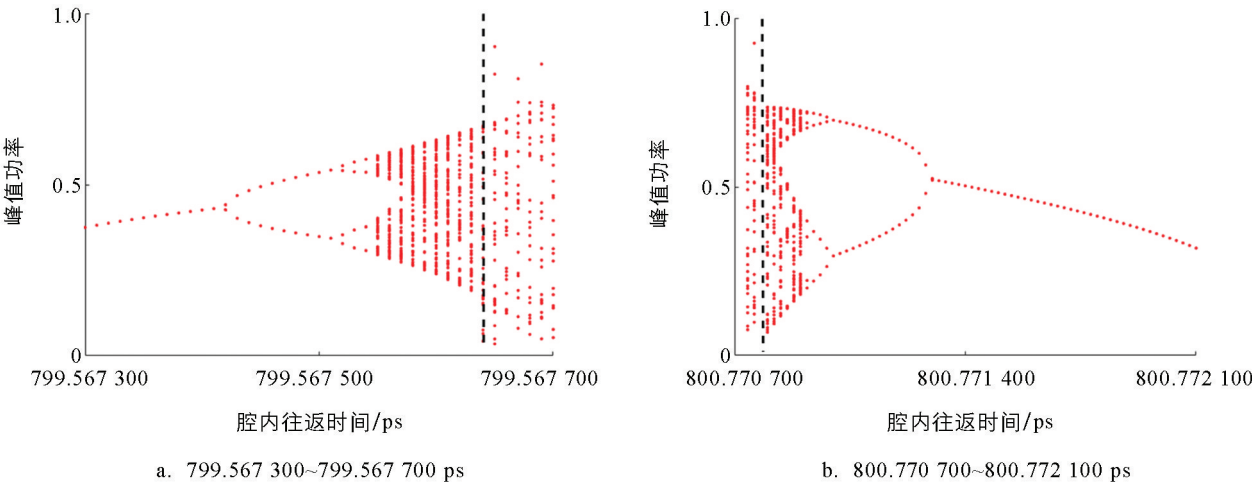


图 9 调 Q 激光峰值功率随腔内光子往返时间变化的分岔图

3 结论

本研究基于四能级系统速率方程，利用四阶龙格-库塔法和自适应变步长法数值模拟了被动调 Q Nd:YAG 固体激光器的非线性动力学特性，分析了泵浦速率、腔内光子往返损耗、腔内光子往返时间等关键系统参量对被动调 Q 激光器非线性动力学的影响。数值模拟结果表明：通过选取不同的关键参量数值，被动

调Q固体激光器可工作在单周期、倍周期、多周期以及脉冲混沌动力学态;当连续变化其中一个关键参量的数值,激光器经历单周期、倍周期、多周期,再进入脉冲混沌态,呈现出倍周期分岔演化路径;激光器也可历经脉冲混沌、多周期、倍周期,再到周期态,呈现出脉冲混沌到周期态的演化路径.首次给出随关键系统参量变化,被动调Q固体激光器动力学态呈现出多种演化路径.此外,数值模拟结果呈现了处于脉冲混沌态的被动调Q固体激光器出现极端事件的情形.

参考文献:

- [1] MEIER M, ROMANO V, FEURER T. Material Processing with Pulsed Radially and Azimuthally Polarized Laser Radiation [J]. Applied Physics A, 2007, 86(3): 329-334.
- [2] 马欲飞, 何应, 于欣, 等. 用于激光诱导等离子体点火技术的激光源研究进展 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(11): 68-73.
- [3] 潘虹, 宋为民, 陈书悦, 等. 大光斑低能量Q开关Nd:YAG激光治疗黄褐斑的疗效分析 [J]. 中华皮肤科杂志, 2012, 45(2): 121-124.
- [4] 崔庆哲, 魏蒙恩, 凌琳, 等. 水雾对调Q Er:YAG激光消融牙本质阈值及损伤的影响 [J]. 中国激光, 2016, 43(12): 32-37.
- [5] TANG D Y, NG S P, QIN L J, et al. Deterministic Chaos in a Diode-Pumped Nd:YAG Laser Passively Q Switched by a Cr_4^+ :YAG Crystal [J]. Optics Letters, 2003, 28(5): 325-327.
- [6] WEI M D, CHEN C H, TU K C. Spatial and Temporal Instabilities in a Passively Q-Switched Nd:YAG Laser with a Cr_4^+ :YAG Saturable Absorber [J]. Optics Express, 2004, 12(17): 3972-3980.
- [7] NG S P, TANG D Y, QIN L J, et al. Period-Doubling Route to Chaos in Diode-Pumped Passively q-Switched Nd:GdVO₄ and Nd:YVO₄ Lasers [J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2006, 16(9): 2689-2696.
- [8] WEI M D, CHENG C C, WU S S. Instability and Satellite Pulse of Passively Q-Switching Nd:LuVO₄ Laser with Cr_4^+ :YAG Saturable Absorber [J]. Optics Communications, 2008, 281(13): 3527-3531.
- [9] YAO B Q, WANG W, TIAN Y, et al. InGaAs/GaAs Saturable Absorber for Diode-Pumped Passively Q-Switched Mode-Locking of Tm:YAP Laser [J]. Laser Physics, 2011, 21(12): 2020-2024.
- [10] KOVALSKY M, HNILO A. Chaos in the Pulse Spacing of Passive Q-Switched All-Solid-State Lasers [J]. Optics Letters, 2010, 35(20): 3498-3500.
- [11] DU Y Q, YAO B Q, DUAN X M, et al. Cr:ZnS Saturable Absorber Passively Q-Switched Tm, Ho:GdVO₄ Laser [J]. Optics Express, 2013, 21(22): 26506-26512.
- [12] HONG K G, WEI M D. Dynamical Behavior and Phase Locking in a Passively Q-Switched Nd:YVO₄ Laser with Pump Modulation [J]. Journal of Optics, 2013, 15(8): 085201.
- [13] BONAZZOLA C, HNILO A, KOVALSKY M, et al. Optical Rogue Waves in an All-Solid-State Laser with a Saturable Absorber: Importance of the Spatial Effects [J]. Journal of Optics, 2013, 15(6): 064004.
- [14] BONAZZOLA C R, HNILO A A, KOVALSKY M G, et al. Features of the Extreme Events Observed in an All-Solid-State Laser with a Saturable Absorber [J]. Physical Review A, 2015, 92(5): 053816.
- [15] TSAI S Y, CHIU C P, CHANG K C, et al. Periodic and Chaotic Dynamics in a Passively Q-Switched Nd:GdVO₄ Laser with Azimuthal Polarization [J]. Optics Letters, 2016, 41(5): 1054-1057.
- [16] HAN S, ZHANG H J, WANG Z P, et al. Sub-Nanosecond Nd:Lu_{0.61}Gd_{0.39}VO₄ microchip Laser [J]. Journal of Modern Optics, 2018, 65(15): 1759-1763.
- [17] BONAZZOLA C. Numerical Modeling of Extreme Events Observed in the All-Solid-State Laser with a Saturable Absorber [J]. Josa B, 2021, 38(4): 1398-1404.
- [18] GAO Z Y, XIA G Q, DENG T, et al. Passively Q-switched And Pulse Amplitude Chaos Operations of A Diode-Pumped Solid-State Nd:LaMgAl₁₁O₁₉ Laser [J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(3): 0314001.
- [19] LI J, PAN Y B, ZENG Y P, et al. The History, Development, and Future Prospects for Laser Ceramics: a Review [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2013, 39: 44-52.
- [20] 葛琳, 李江, 周智为, 等. 直接干压成型与真空烧结技术制备Nd:YAG透明陶瓷 [J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(9): 1226-1233.
- [21] ZHOU Y P, LI X D, XU H B, et al. High-Pulse-Energy Passively Q-Switched Sub-Nanosecond MOPA Laser System Operating at kHz Level [J]. Optics Express, 2021, 29(11): 17201-17214.
- [22] 杨博达, 荆政权, 陈东林, 等. 高温LDAs侧面脉冲泵浦Nd:YAG激光器 [J]. 光子学报, 2021, 50(3): 79-85.
- [23] KALASHNIKOV V L, POLOYKO I G, MIKHAILOV V P, et al. Regular, Quasi-Periodic, and Chaotic Behavior in Continuous-Wave Solid-State Kerr-Lens Mode-Locked Lasers [J]. Journal of the Optical Society of America B, 1997, 14(10): 2691.