

被动调 Q 激光器中的纵模自然选择分析

陈苏园^{1,2} 杨海龙^{1,2} 王明建¹ 张 鑫¹ 蒋 静¹ 孟俊清¹ 陈卫标¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 提出了被动调 Q 激光器谐振腔中的相邻两个纵模之间的建立时间之差的解析表达式, 并给出了可以有效预测小增益以及初始反转粒子数比阈值粒子数大若干倍情况下单频激光运转的概率的方法。为了证实理论预测, 采用腔长 11 cm 以 Cr⁴⁺:YAG 晶体被动调 Q 的 Nd:YAG 激光系统进行了实验验证, 实验结果很好地证明了根据相邻纵模建立时间差所分析出的单频运转的概率, 以及在一定条件下被动调 Q 激光器能在无腔内选模元件的情况下稳定地输出单纵模脉冲。

关键词 激光光学; 被动调 Q 激光器; 纵模选择; 激光理论; 时间判据

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0801006

Analysis of Natural Longitudinal Mode Selection in Passively Q-Switched Lasers

Chen Suyuan^{1,2} Yang Hailong^{1,2} Wang Mingjian¹

Zhang Xin¹ Jiang Jing¹ Meng Junqing¹ Chen Weibiao¹

¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract An analytical expression is developed for the difference in buildup time between two adjacent longitudinal modes in a passively Q-switched laser resonator. The probability of single-frequency operation of both the small gain and the initial inversion population being several times greater than the threshold inversion can be predicted. A Cr⁴⁺:YAG-passively Q-switched Nd:YAG laser set-up with 11 cm cavity length is used to carry out a series of experiments to verify the theoretical predictions. Experimental results support the probability of single mode operating based on adjacent longitudinal mode buildup-time difference, and the laser system can operate stably at single mode without any intra-cavity mode selecting elements in a long time in certain temperature range.

Key words laser optics; passively Q-switched laser; longitudinal mode selection; laser theory; temporal criterion

OCIS codes 140.3540; 140.3580; 140.3430

1 引 言

由于调 Q 激光器具有时间上激光能量的高度集中性及高功率密度, 在近几十年来已经广泛应用于测距、测高、激光雷达及其他遥感系统中^[1]。1971 年, 阿波罗 15 号上搭载的激光测距设备第一次将激光器用于空间应用领域。与工业激光器相比, 长寿命、高稳定性和高可靠性等指标对于空间激光器更加重要。理想状况下, 希望激光器能够单频也就是单纵模运转来消除纵模之间的拍频所导致的尖峰脉冲^[2], 这些尖峰是造成腔内元件损伤的主要原因。为了控制可起振纵模的数目, 激光器的设计中通常应用 F-P 标准具等选模元件来选择性地抑制不希望起振的模式^[3-12]; 然而, 这些选模元件会增加腔内的损耗, 并且更容易造成光学元件的损伤。

收稿日期: 2016-02-29; 收到修改稿日期: 2016-04-22

作者简介: 陈苏园(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail: chensy13@siom.ac.cn

导师简介: 孟俊清(1975—), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要从事固体激光技术方面的研究。

E-mail: jqmeng@mail.siom.ac.cn(通信联系人)

在被动调 Q 激光器出现之后,研究人员发现,被动调 Q 振荡器可以在没有腔内选模元件时输出单纵模脉冲^[4,13-14]。1965年,Sooy^[4]对这种现象进行了分析,提出了一种对被动调 Q 激光器中的自然选模进行定性分析的方法,但是此方法不能精确地预测被动调 Q 激光器单纵模运转的概率。

1999年,Isyanova等^[2]提出了激光器单频调 Q 运转的时间判据:为保证单频运转,激光谐振腔内任意两个纵模的建立时间之差应大于等于激光脉冲的持续时间。同时,也给出了任意两个纵模的建立时间差的速率方程分析方法。然而,文献[2]所提出的时间判据只考虑了小增益的情况,即初始反转粒子数仅稍微大于阈值反转数的情况。而对于被动调 Q 激光器,大多数情况下初始反转粒子数可能比阈值反转数大很多倍,因此文献[2]中所述的方法在这种状况下不能适用。

本文提出了一种新的方法来推导并计算谐振腔内任意两个纵模之间的建立时间差,并且理论预测了在任何状况下单频运转的概率。无论初始反转粒子数比阈值反转数大多少倍,本文方法都是有效的。为了验证理论预测,搭建了一套 Nd:YAG 激光系统进行实验,实验结果与理论预测吻合得很好。实验结果也表明,优化选择谐振腔参数,尤其是较短的腔长和合适的工作温度,可以使一个采用被动 Q 开关的简单的双镜谐振腔稳定地工作在单纵模状态。

2 脉冲建立时间差的解析式

第 n 个纵模的环路增益为^[3-4,15]

$$G_n(t) = \exp[2\sigma_n N(t)l]R_{1n}R_{2n}\epsilon_n L_s, \quad (1)$$

式中 σ_n 是第 n 个纵模所在波长处的受激发射截面, $N(t)$ 是随时间变化的反转粒子数, l 是激光介质的长度, R_{1n} 和 R_{2n} 是谐振腔的反射率, ϵ_n 是第 n 个纵模的损耗项, L_s 是关闭的被动 Q 开关的往返损耗。

反转粒子数取决于抽运速率,可以表示为关于时间的线性函数^[3-4]

$$N(t) = \gamma t - \mu, \quad (2)$$

式中 γ 是激光器的抽运速率,单位为 $\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

所以,由 $G_n(t_n) = 1$,可以得到第 n 个纵模到达阈值的时间 t_n 为

$$(\gamma t_n - \mu) = \frac{-\ln(R_{1n}R_{2n}\epsilon_n L_s)}{2\sigma_n l}. \quad (3)$$

到达阈值时,调 Q 脉冲开始建立,并持续到时间 t_{sn} 。此时,可饱和吸收体开始漂白。当到达阈值后,模式的建立过程近似满足^[2,4]

$$\frac{dP_n(t)}{dt} \approx \frac{P_n(t)}{t_1} \{ \exp[2\sigma_n \gamma (t - t_n)l] - 1 \}, \quad (4)$$

式中 t_1 是环路传输时间(平均驻腔寿命)。

(4)式中的指数项总是很小,所以可以将(4)式改写为

$$\frac{dP_n(t)}{dt} \approx \frac{P_n(t)}{t_1} [2\sigma_n \gamma (t - t_n)l]. \quad (5)$$

通过对(5)式积分,第 n 和第 m 个纵模的相对振幅可以表示为

$$\frac{P_n(t)}{P_m(t)} = \frac{\exp[\sigma_n \gamma l (t - t_n)^2 / t_1]}{\exp[\sigma_m \gamma l (t - t_m)^2 / t_1]}. \quad (6)$$

激光从噪声中建立到 10 kW 需要的信号增大因数大约为 10^{15} 或 e^{35} ^[4]。这个过程需要的时间为 $t_{sn} - t_n$, 并且 $t_{sn} > t_m - t_n$, 由此可以得到

$$\frac{G_n(t_{sn})}{G_n(t_n)} = e^{35}, \quad (7)$$

$$\exp[2\sigma_n (\gamma t_{sn} - \mu)l] (R_{1n}R_{2n}\epsilon_n L_s)^{\frac{t_{sn}-t_n}{t_1}} = e^{35}, \quad (8)$$

结合(6)~(8)式可以得到

$$\frac{P_n(t_{sn})}{P_m(t_{sn})} = \left[\frac{(R_{1n}R_{2n}\epsilon_n L_s)^{\frac{\sigma_m}{\sigma_n}}}{R_{1m}R_{2m}\epsilon_m L_s} \right]^{\frac{t_{sn}-t_n}{t_1}} \exp \left[35 \frac{\sigma_n - \sigma_m}{\sigma_n} \right], \quad (9)$$

最后的指数项通常可以忽略。对于净损耗(反射率)可以得到

$$\frac{P_n(t_{sn})}{P_m(t_{sm})} = \left[\frac{R_{1n}\epsilon_n}{R_{1m}\epsilon_m} \right]^{\frac{t_{sn}-t_n}{t_1}}, \quad (10)$$

式中的指数项 $\frac{t_{sn}-t_n}{t_1}$ 就是环路传输次数 q 。

通过简单的增益微分,得到

$$\frac{P_n(t_{sn})}{P_m(t_{sm})} = \{\exp[2(\sigma_n - \sigma_m)N_0 l]\}^q, \quad (11)$$

结合(6)和(11)式可以得到^[3-4]

$$\frac{P_n(t_{sn})}{P_m(t_{sm})} = \frac{\exp[\sigma_n \gamma l (t_{sn} - t_n)^2 / t_1]}{\exp[\sigma_m \gamma l (t_{sm} - t_m)^2 / t_1]} = \{\exp[2(\sigma_n - \sigma_m)N_0 l]\}^q = 10, \quad (12)$$

所以,环路传输次数 q 可以表示为

$$q = \frac{\ln 10}{2N_0 l (\sigma_n - \sigma_m)}, \quad (13)$$

(13)式将在后面的计算中用到。

由(12)式可以得到

$$\sigma_n \gamma l (t_{sn} - t_n)^2 / t_1 = \sigma_m \gamma l (t_{sm} - t_m)^2 / t_1 + \ln 10, \quad (14)$$

通过求解(14)式可以得到 t_{sn} 的表达式。

在建立时间的定义下,所有谐振腔模在其各自的建立时间内具有相同的光子数密度,即^[2]

$$P_n(t_{sn}) = P_m(t_{sm}), \quad (15)$$

也就是

$$\sigma_n \gamma l (t_{sn} - t_n)^2 / t_1 = \sigma_m \gamma l (t_{sm} - t_m)^2 / t_1. \quad (16)$$

这里考虑到 $\sigma_n \approx \sigma_m$,可以得到 $t_{sn} - t_n = t_{sm} - t_m = qt_1$ 和 $\Delta t_s = t_{sm} - t_{sn} = t_m - t_n$,其中 Δt_s 是第 n 和第 m 个纵模的建立时间差。

结合(14)和(16)式可以得到

$$\sigma_m \gamma l (t_{sm} - t_m)^2 / t_1 + \ln 10 = \sigma_m \gamma l (t_{sm} - t_m)^2 / t_1, \quad (17)$$

用 Δt_s 替换(17)式中的 $t_{sm} - t_{sn}$ 和 $t_m - t_n$,则有

$$\Delta t_s^2 - 2qt_1 \Delta t_s + \ln 10 \frac{t_1}{\sigma_m \gamma l} = 0. \quad (18)$$

(14)式是只有一个未知数 Δt_s 的二次方程,其根为

$$\Delta t_s = qt_1 \pm \sqrt{(qt_1)^2 - \ln 10 \frac{t_1}{\sigma_m \gamma l}}, \quad (19)$$

式中右侧的第二项即 $t_{sn} - t_m$,且 $\Delta t_s = (t_{sn} - t_n) - (t_{sm} - t_m)$,所以有

$$\Delta t_s = qt_1 - \sqrt{(qt_1)^2 - \ln 10 \frac{t_1}{\sigma_m \gamma l}} = qt_1 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\ln 10}{\sigma_m \gamma l q^2 t_1}} \right), \quad (20)$$

式中 $\frac{\ln 10}{\sigma_m \gamma l q^2 t_1}$ 项远小于1,所以可以用 $\frac{1}{2} \frac{\ln 10}{\sigma_m \gamma l q^2 t_1}$ 替换 $\left(1 - \sqrt{1 - \frac{\ln 10}{\sigma_m \gamma l q^2 t_1}} \right)$,得到

$$\Delta t_s \approx qt_1 \frac{1}{2} \frac{\ln 10}{\sigma_m \gamma l q^2 t_1} = \frac{\ln 10}{2\sigma_m \gamma l q}. \quad (21)$$

根据抽运速率的定义,有 $\gamma = \frac{dN_i}{dt_{\text{pump}}}$,这里 N_i 是初始反转粒子数, t_{pump} 是抽运脉冲持续时间。基于调Q理论^[15-16],有

$$N_i = \frac{P_{\text{pump}} t_{\text{pump}} \eta_{\text{st}} \eta}{h\nu_0 V}, \quad (22)$$

式中 P_{pump} 是抽运功率, η 是吸收效率和量子效率的综合因子, h 是普朗克常数, ν_0 是输出激光束的频率, ω 是抽运光束的光斑尺寸, $V = \pi\omega^2 l$ 是模体积, τ_f 是 Nd:YAG 晶体的荧光寿命, $\eta_{\text{st}} = \frac{1 - \exp(-t_{\text{pump}}/\tau_f)}{t_{\text{pump}}/\tau_f}$ 是 $t = t_{\text{pump}}$ 即 Q 开关打开时的存储效率。

由 (22) 式可以得到 γ 的表达式

$$\gamma = \frac{dN_i}{dt_{\text{pump}}} = \frac{P_{\text{pump}} \eta}{h\nu V} \exp\left(-\frac{t_{\text{pump}}}{\tau_f}\right) = N_i \left/ \left\{ \tau_f \left[\exp\left(-\frac{t_{\text{pump}}}{\tau_f}\right) - 1 \right] \right\} \right. \quad (23)$$

将(13)式代入(21)式得到

$$\Delta t_s = \tau_f \left[\exp\left(\frac{t_{\text{pump}}}{\tau_f}\right) - 1 \right] \frac{\sigma_n - \sigma_m}{\sigma_n}, \quad (24)$$

式中 $\frac{\sigma_n - \sigma_m}{\sigma_n}$ 项为归一化增益截面差或模式增益。

3 理论和实验结果的对比

3.1 实验设备和结果

实验在一个无选模元件的 LD 侧面抽运被动调 Q 的 Nd:YAG 激光器系统中进行。光学底板由热膨胀系数较小的钢材料制成, 系统通过一个水冷器进行温度控制。抽运 LD 隔热安装在光学底板上, 实验中控制 LD 的温度保持在 22 °C。谐振腔的光学长度为 11 cm。

实验开始时, 光学底板温度为 22 °C。所测量的调 Q 激光脉冲和用波长计测量的线宽结果分别如图 1 (a)和(b)所示。在这种状况下, 激光器系统可以连续工作超过 24 h, 在此期间无不平滑的脉冲出现。

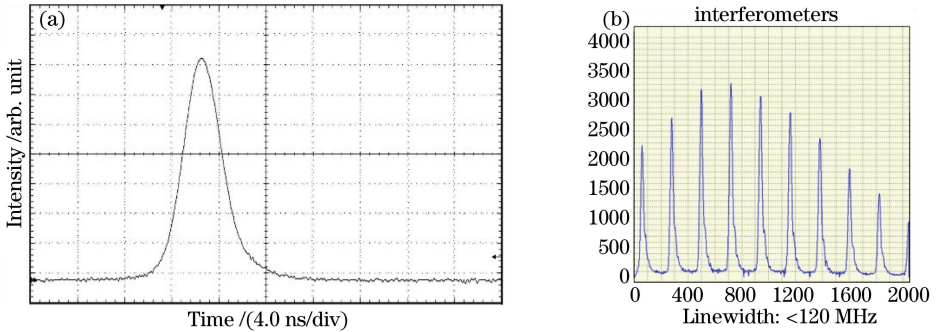


图 1 22 °C 时测量的 (a) 调 Q 激光脉冲和 (b) 波长计的测量结果

Fig. 1 (a) Measured Q-switched laser pulse and (b) measurement result of the wavelength meter at 22 °C

从图 1(a)和(b)可以看出, 测量的脉冲持续时间 t_p 约为 5 ns, 输出激光束的线宽小于 120 MHz。随后逐渐降低光学底板的温度直至 20 °C, 测得的调 Q 脉冲始终保持平滑和稳定。此后, 逐渐升高光学底板的温度。当温度升至 25 °C 时, 测得的调 Q 脉冲稳定性降低。大多数时候类似于图 1(a)所示情况, 但是有时会出现脉冲不光滑甚至深度拍频现象, 如图 2(a)和(b)所示。

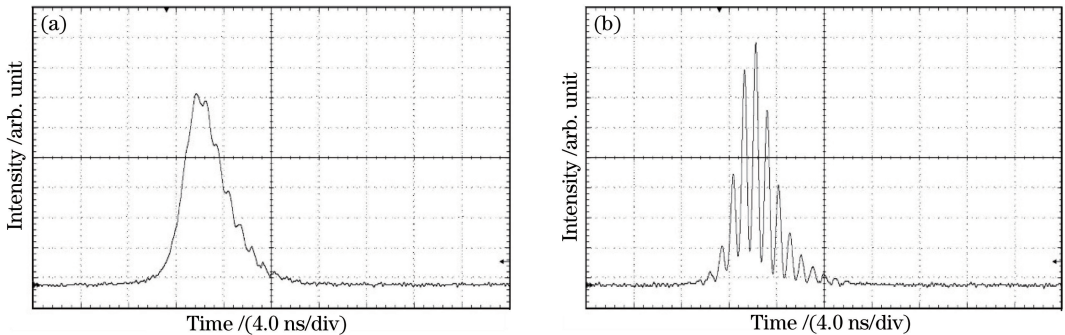


图 2 25 °C 时测量的 (a) 轻微毛刺和 (b) 严重毛刺的调 Q 激光脉冲

Fig. 2 Measured Q-switched laser pulse with (a) slight burrs and (b) sharp burrs at 25 °C

从图 2(a)和(b)可以看出,测量的脉冲持续时间 t_p 仍然约为 5 ns。将有严重调制的调 Q 激光脉冲进行快速傅里叶变换(FFT),可以得到模式间隔大约为 1 GHz 的结果,如图 3 所示。

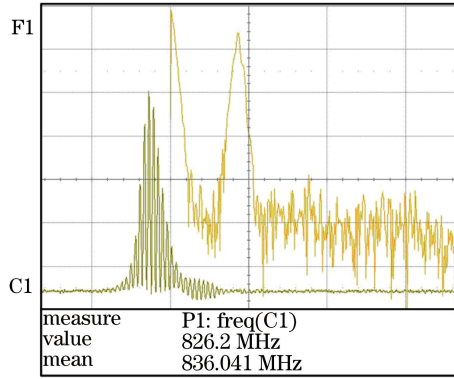


图 3 有严重毛刺的调 Q 激光脉冲 FFT 结果

Fig. 3 FFT result of measured Q-switched laser pulse with sharp burrs

3.2 理论分析

在前文所进行的实验中,可以计算出,对于任意两个频率在 $[\nu_0 - \nu_q, \nu_0 + \nu_q]$ 区间内的纵模,其频率间隔 $\nu_q \approx 1.36$ GHz。计算归一化增益截面差 $\frac{\sigma_n - \sigma_m}{\sigma_n}$ 与第 n 个纵模的频率 ν_n 之间的表达式,这里可假定分母 σ_n 恒为 2.8×10^{-19} cm²。假设 Nd:YAG 的谱线是均匀加宽,具有洛伦兹线型,线宽为 120 GHz,则可以得到 Nd:YAG 在不同跃迁频率下的受激发射截面曲线。当 ν_n 的取值范围 $[\nu_0 - \nu_q, \nu_0]$ 时,第 m 个纵模的频率 ν_m 的取值范围是 $[\nu_0, \nu_0 + \nu_q]$,由 Nd:YAG 在不同跃迁频率下的受激发射截面值可以得到相应的 $\frac{\sigma_n - \sigma_m}{\sigma_n}$ 值,进而可以得出建立时间差 Δt_s 与第 n 个纵模的频率 ν_n 之间的函数关系,如图 4 所示。图中也绘制了 t_p 的曲线作为对比。图 4 中横坐标 ν_n 的取值范围是 $[\nu_0 - \nu_q, \nu_0]$ 。

计算中所用振荡器参数为 $\tau_i = 230$ μ s, $t_{\text{pump}} = 200$ μ s。

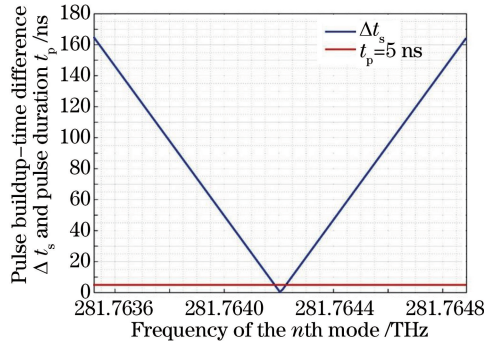


图 4 对 11 cm 长谐振腔计算的脉冲建立时间差 Δt_s 和测量的脉冲持续时间 t_p 与第 n 个纵模的频率之间的曲线

Fig. 4 Calculated pulse buildup-time difference Δt_s and measured pulse duration t_p as a function of the frequency of the n th mode, for a 11 cm-long resonator

由图 4 可以看出, Δt_s 的最小值是 0, 此时第 n 个和第 m 个纵模所在处的频率关于中心跃迁频率对称; 当第 n 个或第 m 个纵模刚好处在中心跃迁频率处时, Δt_s 取得最大值 165 ns。

计算得出, $\Delta t_s \geq t_p$ 的概率是 97%, 也就是说, 如果对系统进行扫频, 在全部增益范围内输出单纵模脉冲的概率可达到 97%。

当光学底板的温度变化时, 谐振腔的腔长变化一个小量 Δl , 进而使输出激光的频率 ν 变化一个小量 $\Delta \nu$ 。可以算得, 对于实验所用钢制底板, 当 $\Delta \nu = \nu_q$ 时, 温度变化为 3 °C。这意味着如果光学底板的温度保持在 $T \pm 1.5$ °C 范围内, 激光器就会工作在单纵模状态。

实验结果与理论分析吻合。当温度升高 3 °C 时产生了拍频, 但温度降低时没有产生, 这可能是其他因素

导致,如腔失谐、温度诱导应力等。

4 结 论

提出了一种新的方法分析谐振腔内任意两个纵模之间的建立时间差,并预测了单频运转的概率。利用这种方法,对一套光学腔长为 11 cm 的被动调 Q Nd:YAG 激光器进行了数值分析,激光谐振腔在全增益谱范围内单纵模运转的概率大于 97%。在一定温度范围内,实验激光器可以在无频率选择元件时长时间稳定工作在单纵模状态,与数值分析结果相吻合。在任意被动调 Q 激光器的设计中应用本文方法,可保证激光器单纵模运转。

参 考 文 献

- 1 Li Menglong, Meng Peibei, Yan Fanjiang, *et al.* Progress on passively Q-switched solid-state lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(9): 090001.
李梦龙, 蒙裴贝, 颜凡江, 等. 高重频被动调 Q 固体激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(9): 090001.
- 2 Isyanova Y, Welford D. Temporal criterion for single-frequency operation of passively Q-switched lasers[J]. Opt Lett, 1999, 24(15): 1035-1037.
- 3 Thevar T M, Watson J. Longitudinal mode selection in a dye Q-switched ruby laser: A comparison between theoretical and experimental results[J]. Proc SPIE, 1996, 2889: 60-69.
- 4 Sooy W R. The natural selection of modes in a passive Q-switched laser[J]. Appl Phys Lett, 1965, 7(2): 36-37.
- 5 Xu Ou. Research and progress of all-fiber single-longitudinal mode lasers based on fiber grating technologies[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(3): 030010.
许 鸥. 基于光纤光栅技术的全光纤单纵模激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(3): 030010.
- 6 Yin Qiwei, Lu Huadong. Influence of wavelength of pump source on output power of 1064 nm laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(9): 091402.
尹祺巍, 卢华东. 抽运波长对连续单频 Nd:YVO₄ 激光器输出特性的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(9): 091402.
- 7 Ishaaya A A, Davidson N, Friesem A. Very high-order pure Laguerre-Gaussian mode selection in a passive Q-switched Nd:YAG laser[J]. Opt Express, 2005, 13(13): 4952-4962.
- 8 Ishaaya A A, Davidson N, Friesem A A, *et al.* Stable selection of very high transverse modes in passive Q-switched lasers[J]. 2005 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe, 2005: 16.
- 9 Davtian A S, Pokrovskiy V P, Sobolev S S, *et al.* Passive Q-switched Nd:YAG single-frequency laser with tunable pulse shape and pulse duration[J]. 2014 International Conference Laser Optics, 2014: 1.
- 10 Song B A, Zhao W J, Ren D M, *et al.* Passively Q-switched laser with single longitudinal mode based on the frequency selection of grating and F-P etalon in twisted-mode folded cavity[J]. Chin Opt Lett, 2009, 7(9): 805-808.
- 11 Basiev T T, Fedin A V, Gavrilov A V, *et al.* Small diameter deep hole drilling by single-mode Nd:YAG laser with scanning passive Q-switch[J]. Proceedings of the International Conference on Lasers-Society for Optical and Quantum Electronics. Society for Optical and Quantum Electronics, 1998: 1060-1063.
- 12 Arumov G P, Bukharov A Y, Nekhaenko V A, *et al.* Single-frequency YAG:Nd³⁺ laser with passive Q switching[J]. Quantum Electronics, 1987, 17(7): 864-865.
- 13 Afzal R S, Yu A W, Dallas J L, *et al.* The geoscience laser altimeter system (GLAS) laser transmitter[J]. IEEE J Sel Top Quant, 2007, 13(3): 511-536.
- 14 Afzal R S, Anthony W Y, Zayhowski J J, *et al.* Single-mode high-peak-power passively Q-switched diode-pumped Nd:YAG laser[J]. Opt Lett, 1997, 22(17): 1314-1316.
- 15 Koehler W. Solid-state laser engineering[M]. Berlin: Springer, 2006.
- 16 Renk K F. Laser principle[M]. Berlin: Springer, 2012.