

# 基于二氧化钒的热控制脉冲波导激光

马利男, 谭 杨, 陈 峰

山东大学物理学院, 山东 济南 250100

**摘要** 利用二氧化钒( $\text{VO}_2$ )的饱和吸收性质,通过消逝场吸收的方式对波导激光进行调节,实现了皮秒脉冲激光输出;通过控制  $\text{VO}_2$  的温度可对输出激光的脉冲宽度、重复频率和能量等进行调控。在  $\text{VO}_2$  薄膜从绝缘相过渡到金属相期间,通过测量复合光波导(掺杂钕铝石榴石波导表面附着  $\text{VO}_2$ )的激光输出,可直接观察到  $\text{VO}_2$  的可饱和吸收性质。 $\text{VO}_2$  薄膜与波导模式这两者之间通过消逝场相互作用,使得  $\text{VO}_2$  对光的吸收显著增加。受益于  $\text{VO}_2$  独特的热驱动光学性质,在 1064 nm 处,波导激光在皮秒脉冲和连续波机制间可有效切换。由于  $\text{VO}_2$  薄膜可饱和吸收的热滞特征,通过冷却或加热处理,在相同的温度条件下,复合波导可产生连续激光和皮秒脉冲激光。这项研究为在芯片级平台上实现热控制有源集成光源提供了一种方法。

**关键词** 材料; 薄膜; 调 Q; 热控制

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0703010

## Pulsed Waveguide Laser Based on Thermal-Control of Vanadium Dioxide

Ma Li'nan, Tan Yang, Chen Feng

School of Physics, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China

**Abstract** Using the saturated absorption properties of vanadium dioxide ( $\text{VO}_2$ ), we achieve picosecond pulse laser output by adjusting waveguide laser via evanescent-field absorption mode. The pulse duration, repetition frequency and energy of output laser can be adjusted by controlling the temperature of  $\text{VO}_2$ .  $\text{VO}_2$  membrane on neodymium-doped yttrium aluminum garnet (Nd:YAG) waveguides can be used as the saturable absorber, whose saturable absorption is directly observed during the transition from the insulator to the metallic phase. Through the evanescent-field interaction of  $\text{VO}_2$  membrane with waveguide mode, the optical absorption of  $\text{VO}_2$  increases significantly. Benefiting from the unique thermal-driven optical properties of  $\text{VO}_2$ , the waveguide lasing at 1064 nm exhibits effective switching of operation between the picosecond pulses and the continuous-wave (CW) regime. Due to the thermal hysteresis feature of the saturable absorption of  $\text{VO}_2$  membrane, the CW and picosecond pulse laser can be generated at the same temperature by either cooling or heating treatments. This work opens a way to achieve thermally controlled active integrated light sources in a chip-scale platform.

**Key words** materials; thin films; Q-switching; thermal-control

**OCIS codes** 310.6860; 140.3540; 230.7380; 130.0250

## 1 引 言

脉冲宽度小于 1 ns 的脉冲激光器具有在短时间内将能量传递到目标的能力,并且能量在材料中的热扩散效应很微弱<sup>[1]</sup>,可以将其应用于临床医学。例如,聚焦的皮秒脉冲能够去除纹身<sup>[2]</sup>。通常,皮秒激光可以通过锁模或调 Q 过程产生<sup>[3]</sup>。在波导激光系统中,与锁模皮秒激光相比,通过调 Q 得到的激光具有更高的峰值功率,应用范围更广。现有的皮秒激光系统多为固体激光器和光纤激光器<sup>[4-7]</sup>。与这两类激光器相比,

收稿日期: 2017-02-24; 收到修改稿日期: 2017-04-01

基金项目: 山东大学青年学者未来计划(2015WLJH20)

作者简介: 马利男(1992—),女,硕士研究生,主要从事波导激光和二维材料方面的研究。E-mail: malinansdu@163.com

导师简介: 谭 杨(1984—),男,副教授,硕士生导师,主要从事离子束技术方面的研究。

E-mail: tanyang@sdu.edu.cn(通信联系人)

近几年来兴起的光波导激光器具有很多优势:尺度更小,结构更紧凑,便于与其他设备集成在同一个芯片上;以光波导结构作为激光谐振腔,可以在低能量抽运下实现低的激光阈值和高的斜率效率,便于构建高效的激光系统;具有更短的谐振腔长度(通常为毫米级),腔体往返时间通常小于 1 ns<sup>[8]</sup>。因此,原则上,皮秒激光脉冲可以在光波导内通过调 Q 产生。但是,光波导激光器的输出功率相对较低,通常难以达到可饱和吸收体的饱和吸收阈值<sup>[9]</sup>。到目前为止,还没有使用可饱和吸收体(例如石墨烯、碳纳米管等)通过调 Q 技术实现的皮秒波导激光器的报道。适当选择具有低可饱和吸收阈值的可饱和吸收体对光波导激光进行调制,是实现皮秒光波导激光器的关键。

二氧化钒(VO<sub>2</sub>)是一种相变材料,在相变过程中,它的电气和光学性质都将发生独特的变化,从而在电子、智能光学、光电子和光子学等领域都具有一定的应用价值<sup>[10]</sup>。VO<sub>2</sub> 薄膜材料在绝缘相与金属相之间转变的时间很短,仅为亚皮秒量级<sup>[11-12]</sup>,因此利用其不同相物理性质的差异可以实现新的功能。例如,VO<sub>2</sub> 材料在绝缘相和金属相时均为反饱和吸收材料,但金属相 VO<sub>2</sub> 的光吸收强度远远低于绝缘相 VO<sub>2</sub> 的光吸收强度。在绝缘相到金属相的转变过程(IMT)中,由于两相间光吸收强度的差异,VO<sub>2</sub> 材料会表现出饱和吸收现象<sup>[13-14]</sup>,故而可将 VO<sub>2</sub> 作为光纤激光系统中的可饱和吸收体,从而产生纳秒脉冲激光。

本课题组将 VO<sub>2</sub> 薄膜与钕离子掺杂钇铝石榴石(Nd:YAG)晶体光波导相结合,构建了复合光波导结构。将 VO<sub>2</sub> 薄膜作为可饱和吸收体,Nd:YAG 光波导作为激光增益介质和谐振腔,在 810 nm 连续激光抽运下实现了调 Q 激光输出,最短的脉冲可达 700 ps,最大峰值功率为 1.7 kW。控制复合光波导的温度在 300~360 K 之间,可以通过热诱导方式调控 IMT 过程,使输出的激光在连续激光、皮秒激光、纳秒激光之间切换。

## 2 复合光波导

采用脉冲激光沉积(PLD)技术在氟化镁晶片表面制备了单晶 VO<sub>2</sub> 薄膜,薄膜厚度为 30 nm。使用 Z 扫描技术对薄膜的饱和吸收性质进行测试后可知 VO<sub>2</sub> 薄膜的调制深度为 0.08%,该调制深度较低,不利于产生短脉冲波导激光。为了提高 VO<sub>2</sub> 薄膜的调制深度,本课题组设计了一种复合波导结构。VO<sub>2</sub> 薄膜被紧紧地压到 Nd:YAG 通道波导表面,见图 1(a)插图,波导宽度为 20 μm。图 1(b)为复合波导 VO<sub>2</sub> 的侧面(X-Z 面)轮廓,红线表示折射率随深度的变化,表现为一个阶梯状的分布;绿色层具有最大的折射率,将限制光在光波导内。图 1(b)左侧为波导中的光强度分布。在波导表面附近,VO<sub>2</sub> 薄膜(黄线)通过消逝场吸收光(即消逝场吸收)。与 Z 扫描测量中的透射吸收(光穿过 VO<sub>2</sub> 薄膜)相比,消逝场吸收可通过控制吸收距离来调制。因此,在复合光波导中,VO<sub>2</sub> 薄膜的调制深度可以通过增加光波导长度来控制。

此外,将 1064 nm 的连续激光器作为激发光源,对该复合光波导的线性吸收进行测试,激光功率为 1 mW。在室温下,复合光波导对光的吸收随入射光偏振角度的变化如图 1(c)所示。入射光的偏振方向垂直 VO<sub>2</sub> 薄膜时(0°),消光比为 0.5 dB;偏振方向旋转 90°后,消光比提高到 3 dB。如果没有 VO<sub>2</sub> 薄膜结构,Nd:YAG 波导对光的吸收在任意偏振角度上均为 0.4 dB。由此可以推断出,在该复合光波导中,VO<sub>2</sub> 薄膜对光的吸收具有偏振选择性。在后续的测试中,保持探测光的偏振方向均平行于薄膜。

在室温下,对该复合光波导的非线性吸收性质进行测试。图 1(a)为测试使用的实验装置示意图,使用 1064 nm 的连续激光对该结构进行测试,测试透射率(出射光与入射光强度之比)的变化。图 1(d)为复合光波导透射率随激发激光功率的变化。从图中可以看出,当激发激光功率高于 70 mW 后,出现了饱和吸收现象。为了定量测试复合波导的饱和吸收性,透射率( $T$ )和激发强度( $I$ )之间的关系采用(1)式进行拟合:

$$T(I) = 1 - \Delta T \times \exp\left(-\frac{I - C}{I_{\text{sat}}}\right) - T_N, \quad (1)$$

式中  $T_N$  为非线性饱和透射率, $I_{\text{sat}}$  为饱和吸收阈值, $\Delta T$  为调制深度, $C$  为常数。图 1(d)中的绿线为拟合线。复合光波导的  $\Delta T$  和  $I_{\text{sat}}$  分别为 12.5% 和 12 mW,此饱和吸收强度比大多数可饱和吸收材料的饱和吸收强度低得多<sup>[15-18]</sup>。根据用于被动 Q 开关激光器的第二阈值标准,可饱和吸收体应首先达到饱和<sup>[19]</sup>。因此,VO<sub>2</sub> 薄膜具有用于高效 Q 开关激光器的潜力。此外,通过消逝场吸收引起的调制深度约为 12.5%,是透射吸收引起的(0.8%)15.6 倍。

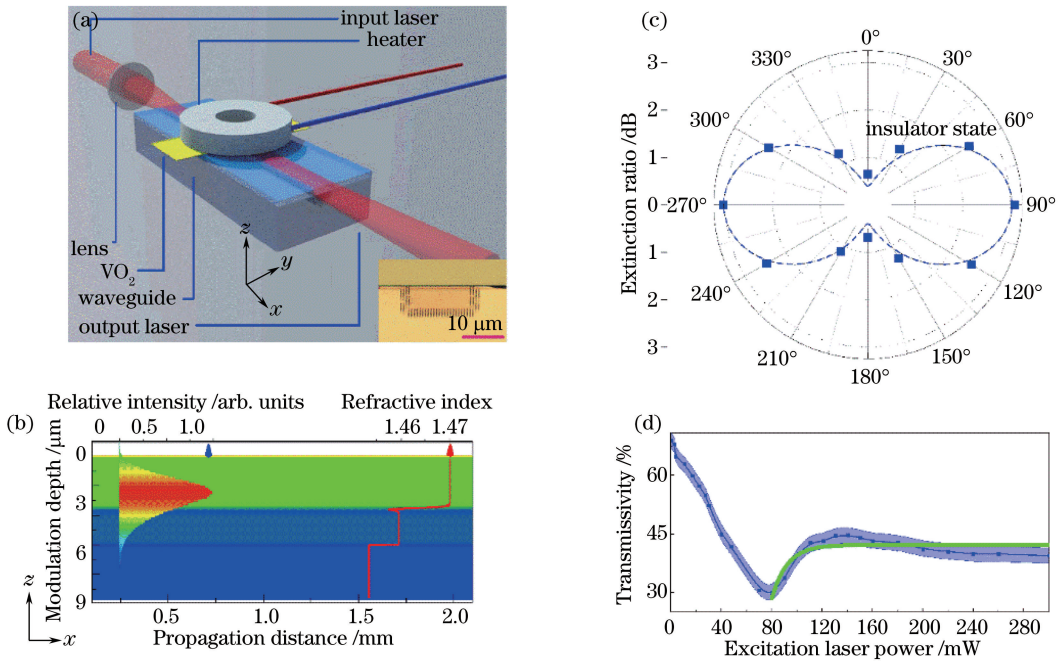


图 1 (a)复合波导激光示意图;(b)波导的折射率;(c)消光比随入射光偏振角度的变化;(d)透射率随激发激光功率的变化

Fig. 1 (a) Schematic diagram hybrid waveguide laser; (b) refractive index of the waveguide; (c) variation of extinction ratio with polarization angle of the incident light; (d) variation of transmissivity with excitation laser power

### 3 光波导激光

图 2(a) 为调 Q 波导激光实验装置图。入射腔镜和出射腔镜的反射率分别为 99.98% 和 90% (1064 nm)。在 810 nm 的激光抽运下, 可得到 1064 nm 的脉冲波导激光。图 2(b) 为输出激光功率随抽运功率的变化。1064 nm 波导激光的阈值为 150 mW, 最大的输出功率为 47 mW, 斜率效率为 6%。当输出腔镜的透射率为 10% 时, 波导的腔内功率约为输出功率的 10 倍。测量得到的最小输出功率为 5 mW, 对应于

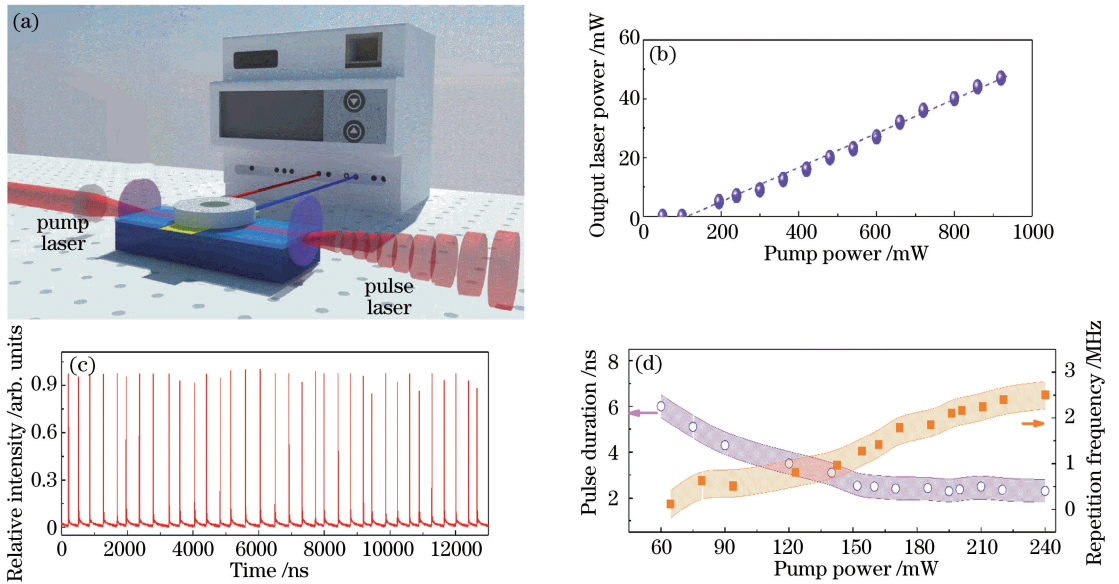


图 2 (a)复合波导脉冲激光抽运实验装置图;(b)输出激光功率随抽运功率的变化;

(c)调 Q 激光脉冲序列;(d)重复频率和脉冲宽度随抽运功率的变化

Fig. 2 (a) Experimental setup for hybrid waveguide pulse laser pumping; (b) output laser power as a function of pump power; (c) Q-switched laser pulse trace; (d) repetition frequency and pulse duration as a function of pump power

50 mW 的腔内功率,远高于 VO<sub>2</sub> 薄膜的饱和吸收阈值。

图 2(c)为输出激光的脉冲序列。图 2(d)为重复频率和脉冲宽度随抽运功率的变化。调 Q 脉冲的重复频率在 0.1~2.5 MHz 范围内被调制,并且输出激光的最小脉冲持续时间为 2.3 ns。根据测量的脉冲持续时间可以计算出复合波导的调制深度,计算公式见(2)式:<sup>[20]</sup>

$$\tau_p = \frac{3.52t_R}{\Delta T}, \quad (2)$$

式中  $\tau_p$  为脉冲持续时间,  $t_R$  为腔内往返时间。调制深度的平均值约为 11%,与(1)式得到的调制深度相似。

VO<sub>2</sub> 薄膜的可饱和吸收取决于绝缘相和金属相对光吸收的差异<sup>[14]</sup>。VO<sub>2</sub> 薄膜的绝缘相可以通过热控制进行调节,这为控制 VO<sub>2</sub> 薄膜的饱和吸收提供了可能。例如,如果复合波导被加热到相变点(333 K)以上,那么 VO<sub>2</sub> 薄膜将保持金属相,不会发生相变引起的饱和吸收现象。

图 3 显示了在不同温度(300~363 K)和相同抽运条件(920 mW, 810 nm)下输出激光的重复频率、脉冲宽度和输出功率;图中的 NL 为纳秒激光, PL 为皮秒激光, CW 为连续波。可见,随着温度从 300 K 升至 325 K,脉冲的重复频率降低。在 325 K 时,最小的脉冲宽度为 800 ps。连续加热 VO<sub>2</sub> 薄膜时,波导激光将转换为 CW 激光输出(在 330 K)。冷却 VO<sub>2</sub> 薄膜时,直到 312 K 才重新出现脉冲序列,并且重复频率逐渐恢复。图 3(b)为绝缘相下脉冲宽度随温度的变化。加热 VO<sub>2</sub> 薄膜,脉冲序列在相变点消失。同时,脉冲序列在冷却过程中显示滞后。在加热(冷却)过程中,在 317~327 K(312~316 K)的温度范围内获得了 910~700 ps(951~833 ps)的脉冲激光。图 3(c)为输出激光功率。在加热过程中,在相变点(333 K)处出现了拐点。在这点附近,平均输出功率从 48 mW 降低到 20 mW。超过相变点温度后,平均输出功率逐渐恢复到 37 mW。当冷却至室温时,输出功率从 37 mW 提高到 47 mW,且几乎呈线性增加。

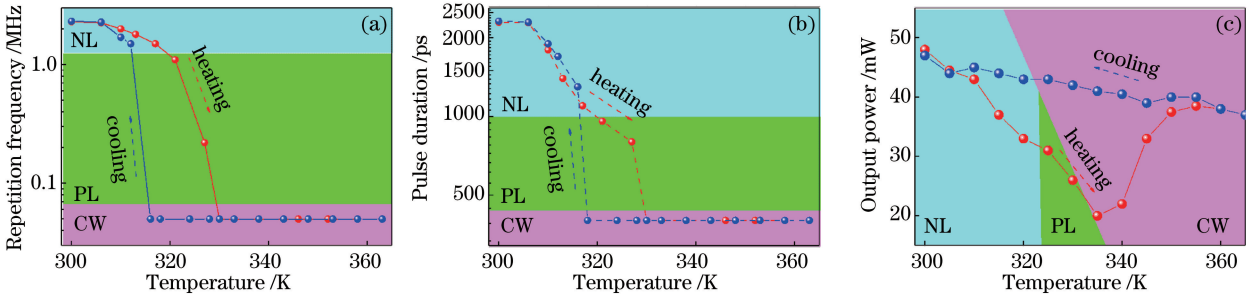


图 3 输出激光的(a)重复频率、(b)脉冲宽度和(c)输出激光功率随 VO<sub>2</sub> 薄膜温度的变化

Fig. 3 Variation of (a) repetition frequency, (b) pulse duration and (c) output laser power with temperature of VO<sub>2</sub> membrane

## 4 结 论

构建了基于 VO<sub>2</sub> 薄膜和 Nd:YAG 光波导的复合光波导结构。VO<sub>2</sub> 薄膜具有由相变诱导的饱和吸收性质,在复合光波导中可作为饱和吸收体。在 810 nm 连续激光抽运下,该复合光波导产生了调 Q 脉冲激光输出。实验发现,通过改变 VO<sub>2</sub> 薄膜的温度可以控制 VO<sub>2</sub> 的相变程度,进而调控 VO<sub>2</sub> 的饱和吸收性质。对该复合光波导的加热或降温过程进行控制,输出激光可在皮秒激光、纳秒激光和连续激光之间切换。通过对 VO<sub>2</sub> 薄膜进行热控制发现调 Q 激光性能表现出热滞后现象。连续激光和脉冲激光可以通过温度来控制。在 325 K 下,脉冲激光和连续激光可以分别通过加热和冷却来激发。这项工作为动态可控皮秒波导激光器的集成开辟了新思路。

## 参 考 文 献

- [1] Beg F N, Bell A R, Dangor A E, *et al.* A study of picosecond laser-solid interactions up to 10<sup>-19</sup> W · cm<sup>-2</sup> [J]. *Physics of Plasmas*, 1997, 4(2): 447-457.
- [2] Zhang C, Zhang C M. A switchable femtosecond and picosecond soliton fiber laser mode-locked by carbon nanotubes [J]. *Laser Physics*, 2015, 25(7): 075104.

- [3] Giesen A, Speiser J. Fifteen years of work on thin-disk lasers: results and scaling laws[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(3): 598-609.
- [4] Tan Y, Akhmadaliev S, Zhou S, *et al.* Guided continuous-wave and graphene-based Q-switched lasers in carbon ion irradiated Nd:YAG ceramic channel waveguide[J]. Optics Express, 2014, 22(3): 3572-3577.
- [5] Yu Y, Zhu J F, Li J, *et al.* High power passively Q-switched laser of diode-pumped domestic Yb:YAG ceramic[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(10): 1001007.  
于 洋, 朱江峰, 李 江, 等. 二极管抽运国产 Yb:YAG 陶瓷高功率被动调 Q 激光器[J]. 中国激光, 2016, 43(10): 1001007.
- [6] Wang X L, Sang M, Zhu P, *et al.* Passively Q-switched pulse fiber laser based on graphene saturable absorber[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602015.  
王晓龙, 桑 梅, 朱 攀, 等. 基于石墨烯可饱和吸收体的被动调 Q 光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602015.
- [7] Givas C. Optically pumped planar waveguide lasers, Part I: fundamentals and fabrication techniques[J]. Progress in Quantum Electronics, 2011, 35(6): 159-239.
- [8] Ams M, Marshall G D, Dekker P, *et al.* Ultrafast laser written active devices[J]. Laser & Photonics Reviews, 2009, 3(6): 535-544.
- [9] Zhao C J, Zou Y H, Chen Y, *et al.* Wavelength-tunable picosecond soliton fiber laser with topological insulator: Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> as a mode locker[J]. Optics Letters, 2012, 20(1): 27888-27895.
- [10] Lysenko S, Rua A, Fernandez F, *et al.* Optical nonlinearity and structural dynamics of VO<sub>2</sub> films[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105(4): 043502.
- [11] Appavoo K, Wang B, Brady N F, *et al.* Ultrafast phase transition via catastrophic phonon collapse driven by plasmonic hot-electron injection[J]. Nano Letters, 2014, 14(3): 1127-1133.
- [12] Cocker T L, Titova L V, Fourmaux S, *et al.* Phase diagram of the ultrafast photoinduced insulator-metal transition in vanadium dioxide[J]. Physical Review B, 2012, 85(15): 155120.
- [13] Biermann S, Poteryaev A, Lichtenstein A I, *et al.* Dynamical singlets and correlation-assisted Peierls transition in VO<sub>2</sub> [J]. Physical Review Letters, 2005, 94(2): 026404.
- [14] Pollack S A, Chang D B, Chudnovky F A, *et al.* Passive Q switching and mode-locking of Er: glass lasers using VO<sub>2</sub> mirrors[J]. Journal of Applied Physics, 1995, 78(6): 3592-3599.
- [15] Shibuya K, Tsutsumi J, Hasegawa T, *et al.* Fabrication and Raman scattering study of epitaxial VO<sub>2</sub> films on MgF<sub>2</sub> (001) substrates[J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(2): 021604.
- [16] Bao Q L, Zhang H, Wang Y, *et al.* Atomic-layer graphene as a saturable absorber for ultrafast pulsed lasers[J]. Advanced Functional Materials, 2009, 19(19): 3077-3083.
- [17] Garmire E. Resonant optical nonlinearities in semiconductors [J]. IEEE Journal of Selected Topics Quantum Electronics, 2000, 6(6): 1094-1110.
- [18] Tan Y, Akhmadaliev S, Zhou S, *et al.* Guided continuous-wave and graphene-based Q-switched lasers in carbon ion irradiated Nd:YAG ceramic channel waveguide[J]. Optics Express, 2014, 22(3): 3572-3577.
- [19] Tan Y, Cheng C, Akhmadaliev S, *et al.* Nd:YAG waveguide laser Q-switched by evanescent-field interaction with graphene[J]. Optics Express, 2014, 22(8): 9101-9106.
- [20] Chen Y F, Lan Y P, Chang H L. Analytical model for design criteria of passively Q-switched lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2001, 37(3): 462-468.