

# 基于银纳米棒饱和吸收体的 2 μm 脉冲激光特性

张程<sup>1,2,3</sup>, 张华年<sup>1,2,3</sup>, 刘杰<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> 山东师范大学物理与电子科学学院, 山东 济南 250014;

<sup>2</sup> 山东省光学与光子器件技术重点实验室, 山东 济南 250014;

<sup>3</sup> 山东师范大学大数据与信息研究院, 山东 济南 250014

**摘要** 制备了吸收波长为 2 μm 的银纳米棒(ANRs),并将其作为可饱和吸收体应用于 2 μm 被动调 Q 激光器中。采用结构紧凑的直线腔设计,实现了稳定的激光二极管抽运 2 μm 被动调 Q 脉冲激光运转。在吸收抽运功率为 5.73 W 的情况下,获得的调 Q 平均输出功率为 118 mW,重复频率和脉冲宽度分别为 24.32 kHz 和 1.455 μs。

**关键词** 材料; 银纳米棒吸收体; 被动调 Q 激光; Tm:YAP 晶体

**中图分类号** TN248.1

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.0703022

## Characteristics of 2 μm Pulse Laser Based on Argentum Nanorod Saturable Absorber

Zhang Cheng<sup>1,2,3</sup>, Zhang Huanian<sup>1,2,3</sup>, Liu Jie<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> School of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan, Shandong 250014, China;

<sup>2</sup> Shandong Provincial Key Laboratory of Optics and Photonic Device, Jinan, Shandong 250014, China;

<sup>3</sup> Institute of Data Science and Technology, Shandong Normal University, Jinan, Shandong 250014, China

**Abstract** Argentum nanorods (ANRs) with the absorption wavelength of 2 μm are prepared and employed as a saturable absorber in a 2 μm passively Q-switched laser. A laser diode (LD) pumped by 2 μm passively Q-switched laser is designed with a compact linear cavity. When the absorbed pump power is 5.73 W, average output power of 118 mW, repetition rate of 24.32 kHz and pulse width of 1.455 μs are obtained.

**Key words** materials; argentum nanorod absorber; passively Q-switched laser; Tm:YAP crystal

**OCIS codes** 160.4236; 140.3480; 140.3540

## 1 引言

波长为 2 μm 的激光对人眼没有伤害,手术中对人体组织的穿透深度浅,是应用广泛的外科手术光源。2 μm 处于大气传输窗口,该波长的激光在大气中传输具有良好的透过性,并在激光测距、相干多普勒雷达、差分吸收雷达、激光遥感和光通信等领域具有广阔的应用前景。同时,波长为 2 μm 的激光是获得 3~5 μm 波段和 8~12 μm 波段光学参量振荡器的理想抽运源<sup>[1]</sup>。因此,从 20 世纪 60 年代开始,科研工作者一直在对波长为 2 μm 的激光进行多方位的探索研究,以期提高 2 μm 激光器的输出功率及效率。基于被动调 Q 技术的激光二极管(LD)抽运掺铥(Tm<sup>3+</sup>)激光是实现 2 μm 脉冲输出的重要技术手段<sup>[2-4]</sup>,二维材料的出现给波长为 2 μm 的被动调 Q 脉冲激光的研究提供了一个新的机遇<sup>[5-9]</sup>。二维材料[如石墨烯<sup>[10-14]</sup>、二硫化钼(MoS<sub>2</sub>)<sup>[15-16]</sup>、二硫化钨(WS<sub>2</sub>)<sup>[17-18]</sup>和二硒化钼(MoSe<sub>2</sub>)<sup>[19]</sup>等]具有独特的零带隙结构,光谱吸收范围较大,被广泛地应用于脉冲激光领域,并极大地推动了脉冲激光的发展。20 世纪末,纳米科学技术的飞速发展

**收稿日期:** 2017-02-13; **收到修改稿日期:** 2017-05-08

**基金项目:** 国家自然科学基金(61475089)

**作者简介:** 张程(1994—),女,硕士研究生,主要从事全固态激光技术方面的研究。E-mail: 13256715081@163.com

**导师简介:** 刘杰(1963—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事全固态激光技术方面的研究。

E-mail: jieliu@sdu.edu.cn

使纳米材料逐渐走进人类的生产和生活。纳米材料在结构上与常规晶态和非晶态材料有很大的差别,纳米粒子因其表面效应和量子尺寸效应,具有不同于常规二维材料的特性<sup>[20-22]</sup>。银纳米棒(ANRs)作为一种金属纳米材料,在表面增强拉曼光谱、表面增强共振散射光谱、分子生物学和超分子体系等领域占有极为重要的地位<sup>[23-24]</sup>,是基础理论研究的重要材料之一<sup>[25]</sup>。然而,关于金属纳米材料在脉冲激光场中应用的研究较少,金纳米材料在固体激光不同波段被动调Q实验中的应用已有报道<sup>[26-28]</sup>,银纳米材料在固体激光调制方面的特性研究却鲜有报道。已有研究表明,通过改变银纳米颗粒的尺寸、结构、排列和介电环境等特性参数,可实现局域表面等离子共振(LSPR)的可调性<sup>[29]</sup>,因此银纳米材料可用于制作不同波段激光的调制器件。

本文通过控制银纳米颗粒的长径比,使得 ANRs 的纵向表面等离子共振(SPR)吸收峰位于 2000 nm,成功制备了吸收波长为 2  $\mu\text{m}$  的 ANRs 可饱和吸收体,并使用该吸收体实现了 2  $\mu\text{m}$  被动调 Q 的脉冲激光运转。激光平均输出功率为 118 mW,相应的重复频率和脉冲宽度分别为 24.32 kHz 和 1.455  $\mu\text{s}$ 。

## 2 ANRs 可饱和吸收体的制备

实验中所用的 ANRs 溶液是采用种子介导生长法制备得到的。实验中,首先制备金纳米双锥溶液,步骤为:1)将 50  $\mu\text{L}$  四氯金酸(质量分数为 1%)和 74  $\mu\text{L}$  柠檬酸钠(质量分数为 1%)加入 9.87 mL 的超纯水中,使劲搅拌后加入冰的 150  $\mu\text{L}$  硼氢化钠(0.01 mol),继续搅拌 1 min 后得到金种子溶液;2)将 2 mL 四氯金酸(0.01 mol)、400  $\mu\text{L}$  硝酸银(0.01 mol)、800  $\mu\text{L}$  氯化氢(1 mol)和 320  $\mu\text{L}$  抗坏血酸(0.1 mol)依次加入 40 mL 西曲溴铵(0.1 mol)中,每次加入时摇晃 10 s,混合均匀后加入 200  $\mu\text{L}$  金种子溶液;3)将溶液放置在恒温 30  $^{\circ}\text{C}$  的烘箱中,10 h 后便可得到金纳米双锥溶液。制备 ANRs 溶液的步骤为:1)取 0.5 mL 金纳米双锥溶液,控制匀胶机在转速为 6000  $\text{r}\cdot\text{s}^{-1}$  左右离心 10 min;2)将溶液稀释至 5 mL,并将稀释溶液加入 10 mL 西曲溴铵(0.08 mol);3)在溶液中加入 1700  $\mu\text{L}$  硝酸银(0.01 mol)和 850  $\mu\text{L}$  抗坏血酸(0.1 mol);4)将溶液置于 65  $^{\circ}\text{C}$  的烘箱内,4 h 后取下层沉淀便可获得性质稳定的 ANRs 溶液。将 ANRs 溶液滴涂在石英玻片上,控制匀胶机在转速为 1800  $\text{r}\cdot\text{s}^{-1}$  下离心 30 s,使其均匀附着在石英玻片上,重复操作两次,然后在室温下晾干,便得到实验中所用的 ANRs 可饱和吸收体。图 1 为 ANRs 颗粒的透射电子显微镜(TEM)图片。

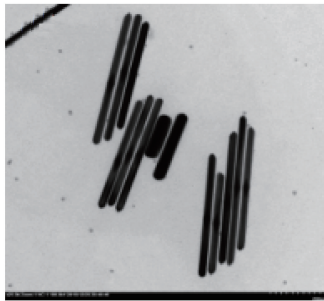


图 1 ANRs 的 TEM 图片

Fig. 1 TEM image of ANRs

## 3 ANRs 调 Q 特性实验研究

实验装置如图 2 所示,抽运 LD 的中心波长为 795 nm,输出功率为 30 W,光纤芯径为 400  $\mu\text{m}$ ,数值孔径(NA)为 0.22,聚焦耦合透镜比例为 1:1。实验选用尺寸为 3 mm $\times$ 3 mm $\times$ 5 mm、掺杂浓度为 5%的 Tm:YAP 晶体作为激光增益介质。水冷的温度控制在 14  $^{\circ}\text{C}$ 。输入镜 M1 为凹镜,曲率半径为 100 mm,凹镜前表面镀 780~810 nm 的增透膜,后表面镀 780~810 nm 的增透膜和 1900~2000 nm 的高反膜。输出镜 M2 是在 1900~2000 nm 波段范围内透过率为 2%的平镜。为了使抽运源的发射波长与激活离子的吸收峰更好地吻合,可通过调节 LD 的温度将其发射波长调节至 795 nm。实验中采用简单的直线腔(腔长为 43 mm)结构,利用 ABCD 定理计算得到最大抽运功率为 5.5 W 时激光晶体上的有效光斑半径约为 240  $\mu\text{m}$ ,束腰半径约为 200  $\mu\text{m}$ ,并且能够实现稳定的调 Q 运转。

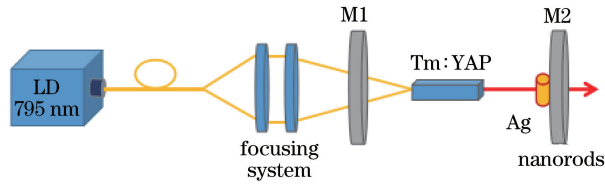


图 2 实验装置图

Fig. 2 Experimental setup diagram

实验研究了 Tm:YAP 的连续激光特性(不放 ANRs 吸收体),在连续激光(CW)的实验中输出功率随晶体吸收抽运功率的变化曲线如图 3(a)所示。当晶体吸收抽运功率在 1.3~6.6 W 范围内变化时,CW 的输出功率随吸收抽运功率的增加而增加。当吸收抽运功率为 6.65 W 时,得到最大连续光输出功率为 414 mW。随后进行被动调 Q 脉冲激光特性的研究,将 ANRs 放置在最小束腰位置,通过调节得到稳定的被动调 Q 激光运转。当晶体吸收抽运功率为 5.73 W 时,使用激光功率计(型号 30A-SH-V1,OPHTR,以色列)测量得到调 Q 脉冲激光的最大输出功率为 118 mW。用激光功率计每隔 5 min 测量一次脉冲激光器的输出功率,持续观察 1 h,最后计算得到脉冲激光器输出功率的变化幅度约为 1.5%。由于 ANRs 可饱和吸收体的阈值较低,抗损伤能力不强,进一步加大抽运功率后调 Q 脉冲不稳定,所以不再增加抽运功率。图 3(b)给出了由数字示波器(型号 MDO4104C,Tektronix,美国)和快速光电探测器(型号 ET-5000,上升时间 250 ps,Electro-Optics Technology,美国)测得的稳定调 Q 脉冲下的脉冲宽度和重复频率随抽运功率的变化曲线。从图中可以看出,随着抽运功率的增加,重复频率逐渐增大,脉冲宽度逐渐减小,这是因为 ANRs 在高光功率密度下可以更快地达到吸收饱和,相当于提高了开关速度。晶体的吸收抽运功率为 5.73 W 时,对应的脉冲重复频率和最小脉冲宽度分别为 24.32 kHz 和 1.455  $\mu$ s。图 3(c)给出了吸收抽运功率分别为 3.58,4.15,4.737,5.395 W 时的调 Q 波形图。从图中可以看出,在一定的响应时间内,随着吸收抽运功率的增加,重复频率增加,脉冲宽度减小。图 3(d)给出了单脉冲能量和峰值功率随吸收抽运功率的变化曲线。从图中可以看出,

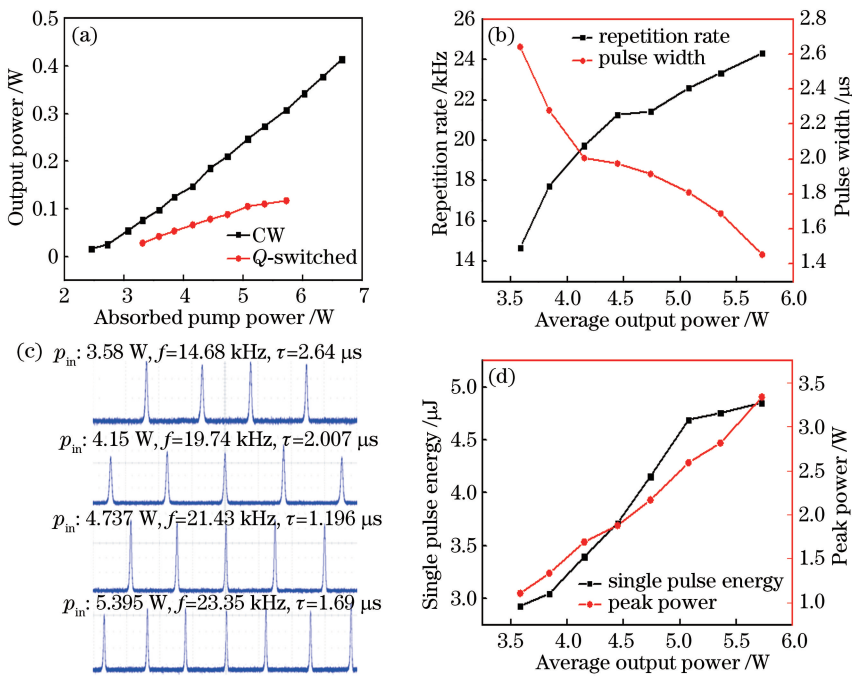


图 3 (a)调 Q 输出功率和 CW 输出功率随吸收抽运功率的变化;(b)脉冲宽度和重复频率随吸收抽运功率的变化;  
(c)晶体吸收抽运功率分别为 3.58,4.15,4.737,5.395 W 时的调 Q 波形图;(d)单脉冲能量和峰值功率随吸收抽运功率的变化  
Fig. 3 (a) Variations in Q-switched output power and CW output power with absorbed pump power; (b) variations  
in pulse width and repetition rate with absorbed pump power; (c) Q-switched pulse trains under absorbed pump powers  
of 3.58, 4.15, 4.737, 5.395 W; (d) variations in single pulse energy and peak power with absorbed pump power

单脉冲能量和峰值功率都随吸收抽运功率的增加而增加,其中单脉冲能量随吸收抽运功率线性增加到一定程度后呈现缓和趋势,主要原因可能是 ANRs 的抗损伤阈值较低,为了保护 ANRs 吸收体,没有继续加大抽运功率,这样腔内光强也得不到进一步加强。吸收抽运功率为 5.73 W 时,相应的最大单脉冲能量和峰值功率分别为 4.85  $\mu\text{J}$  和 3.33 W。

图 4 给出了晶体吸收抽运功率为 5.73 W 时示波器记录的调 Q 脉冲波形,最小脉宽为 1.455  $\mu\text{s}$ 。在较高的抽运功率下,纳米材料存在热凝聚现象,使 LSPR 吸收峰出现一定的变化,从而使得调制不稳定,后期工作中将采取复合石墨烯或者加装二氧化硅外壳来改善材料特性。此外,LSPR 吸收是一种共振吸收,材料的排列不均匀会造成吸收不稳定,可通过 ANRs 的特定排列来改善吸收不稳定性。如图 5 所示,利用光谱仪(型号 MS 3504i,SOL instruments,俄罗斯)测得光谱的中心波长为 1988.4 nm,光谱半峰全宽为 1.99 nm。

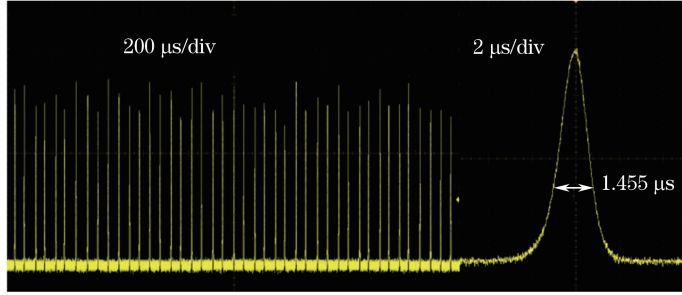


图 4 吸收抽运功率为 5.73 W 时的调 Q 脉冲波形图

Fig. 4 Q-switched pulse trains with absorbed pump power of 5.73 W

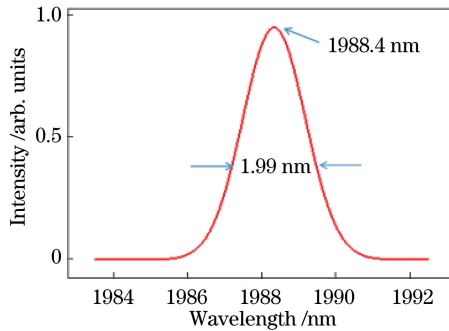


图 5 调 Q 输出光谱图

Fig. 5 Q-switched output spectrogram

## 4 结 论

银纳米材料在生物传感、生物成像以及表面增强拉曼等领域具有广阔的应用前景。通过控制 ANRs 材料的 SPR 峰,成功制备了吸收波长为 2  $\mu\text{m}$  的可饱和吸收体。采用结构简单、紧凑的直线腔结构设计,将 ANRs 作为可饱和吸收体,实现了 LD 抽运 Tm:YAP 晶体在波长为 2  $\mu\text{m}$  处的被动调 Q 脉冲激光运转。当晶体吸收抽运功率为 5.73 W 时,可获得最大单脉冲能量为 4.85  $\mu\text{J}$ 、峰值功率为 3.33 W 的被动调 Q 脉冲激光。实验结果表明,ANRs 作为可饱和吸收体在波长为 2  $\mu\text{m}$  处有很好的应用前景。下一步工作将进一步优化谐振腔结构和 ANRs 长径比等参数,并结合谐振腔的优化设计来获得波长为 2  $\mu\text{m}$  的连续锁模激光脉冲输出。

## 参 考 文 献

- [1] Zhao Yuanyuan, Hou Xia, Chen Weibiao. Research and progress of 2  $\mu\text{m}$  all-solid-state laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006, 43(6): 20-24.  
赵媛媛, 侯霞, 陈卫标. 2  $\mu\text{m}$  全固态激光器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(6): 20-24.
- [2] Yu Yang, Zhu Jiangfeng, Li Jiang, *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.
- [3] Dong Jun, Wang Guangyu, Ren Yingying. Advances in passively Q-switched solid-state lasers based on composite materials[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0601003.  
董 俊, 王光宇, 任滢滢. 基于复合材料的被动调 Q 固体激光器的研究进展[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0601003.
- [4] El-Sherif A F, King T A. Evaluation of a high power Q-switched Tm<sup>3+</sup>-doped silica fiber laser operating near 2 μm [C]. SPIE, 2006, 6102: 61020R.
- [5] Yu J R, Trieu B C, Modlin E A, *et al.* 1 J/pulse Q-switched 2 μm solid-state laser[J]. Optics Letters, 2006, 31(4): 462-464.
- [6] Eichhorn M, Jackson S D. High-pulse-energy actively Q-switched Tm<sup>3+</sup>-doped silica 2 μm fiber laser pumped at 792 nm[J]. Optics Letters, 2007, 32(19): 2780-2782.
- [7] Wan H L, Cai W, Wang F, *et al.* High-quality monolayer graphene for bulk laser mode-locking near 2 μm[J]. Optical and Quantum Electronics, 2016, 48: 11.
- [8] Meng P B, Yao B Q, Zhu G L, *et al.* RTP Q-switched 2 μm Tm, Ho: GdVO<sub>4</sub> laser[J]. Laser Physics, 2011, 21(1): 94-96.
- [9] Jiang M, Ma H F, Ren Z Y, *et al.* A graphene Q-switched nanosecond Tm-doped fiber laser at 2 μm[J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(5): 055103.
- [10] Luo Z Q, Zhou M, Weng J, *et al.* Graphene-based passively Q-switched dual-wavelength erbium-doped fiber laser[J]. Optics Letters, 2010, 35(21): 3709-3711.
- [11] Zhang H, Tang D Y, Knize R J, *et al.* Graphene mode locked, wavelength-tunable, dissipative soliton fiber laser[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(11): 111112.
- [12] Zhu H T, Zhao L N, Liu J, *et al.* Monolayer graphene saturable absorber with sandwich structure for ultrafast solid-state laser[J]. Optical Engineering, 2015, 55(8): 081304.
- [13] Cai W, Jiang S Z, Xu S C, *et al.* Graphene saturable absorber for diode pumped Yb:Sc<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> mode-locked laser[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 65: 1-4.
- [14] Mortazavi S Z, Parvin P, Reyhani A. Fabrication of graphene based on Q-switched Nd:YAG laser ablation of graphite target in liquid nitrogen[J]. Laser Physics Letters, 2012, 9(7): 547-552.
- [15] Du J, Wang Q K, Jiang G B, *et al.* Ytterbium-doped fiber laser passively mode locked by few-layer molybdenum disulfide (MoS<sub>2</sub>) saturable absorber functioned with evanescent field interaction[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 6346.
- [16] Zhang M, Howe R C T, Woodward R I, *et al.* Solution processed MoS<sub>2</sub>-PVA composite for sub-bandgap mode-locking of a wideband tunable ultrafast Er: fiber laser[J]. Nano Research, 2015, 8(5): 1522-1534.
- [17] Mao D, Wang Y D, Ma C J, *et al.* WS<sub>2</sub> mode-locked ultrafast fiber laser[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 7965.
- [18] Kassani S H, Khazaeinezhad R, Jeong H, *et al.* All-fiber Er-doped Q-switched laser based on tungsten disulfide saturable absorber[J]. Optical Materials Express, 2015, 5(2): 373-379.
- [19] Chen B H, Zhang X Y, Wu K, *et al.* Q-switched fiber laser based on transition metal dichalcogenides MoS<sub>2</sub>, MoSe<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>, and WSe<sub>2</sub>[J]. Optics Express, 2015, 23(20): 26723-26737.
- [20] Kang Z, Xu Y, Zhang L, *et al.* Passively mode-locking induced by gold nanorods in erbium-doped fiber lasers[J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(4): 041105.
- [21] Jiang T, Xu Y, Tian Q J, *et al.* Passively Q-switching induced by gold nanocrystals[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(15): 151122.
- [22] Kang Z, Guo X Y, Jia Z X, *et al.* Gold nanorods as saturable absorbers for all-fiber passively Q-switched erbium-doped fiber laser[J]. Optical Materials Express, 2013, 3(11): 1986-1991.
- [23] Rao W Y, Li Q, Wang Y Z, *et al.* Comparison of photoluminescence quantum yield of single gold nanopillars and gold nanorods[J]. ACS Nano, 2015, 9(3): 2783-2791.
- [24] Li Q, Zhuo X L, Li S, *et al.* Production of monodisperse gold nanopillars with number percentages approaching 100% and evaluation of their plasmonic properties[J]. Advanced Optical Materials, 2015, 3(6): 801-812.
- [25] Zhu Guiqin, Shi Jianguo, Wang Wanlin. Progress in preparation and applications of silver nano-materials[J]. Science & Technology Review, 2010, 28(22): 112-117.  
朱桂琴, 史建公, 王万林. 银纳米材料制备和应用进展[J]. 科技导报, 2010, 28(22): 112-117.
- [26] Zhang H N, Liu J. Gold nanopillars as saturable absorbers for passively Q-switched laser generation in the 1.1 μm

- region[J]. Optics Letters, 2016, 41(6): 1150-1152.
- [27] Huang H T, Li M, Liu P, *et al.* Gold nanorods as the saturable absorber for a diode-pumped nanosecond Q-switched 2  $\mu\text{m}$  solid-state laser[J]. Optics Letters, 2016, 41(12): 2700-2703.
- [28] Zhang F, Zhang H N, Liu D H, *et al.* Tunable Nd, La:SrF<sub>2</sub> laser and passively Q-switched operation based on gold nanobipyramids saturable absorber[J]. Chinese Physic B, 2017, 26(2): 024205.
- [29] Zhu J, Zhu K, Huang L Q. Using gold colloid nanoparticles to modulate the surface enhanced fluorescence of rhodamine B[J]. Physics Letters A, 2008, 372(18): 3283-3288.