

金纳米棒饱和吸收体 $1\ \mu\text{m}$ 被动调 Q 固体激光器

黄海涛^{1,3}, 李 敏¹, 金 琳¹, 王 辉¹, 刘 翩¹, 沈德元²

¹江苏师范大学物理与工程学院, 江苏 徐州 221116;

²复旦大学光科学与工程系, 上海 200433;

³江苏省先进激光材料与器件重点实验室, 江苏 徐州 221116

摘要 受表面等离子共振效应的影响, 金纳米棒饱和吸收体具有饱和吸收宽带可调、非线性响应时间快等特点, 且便于与各种激光谐振腔整合, 是一种有潜力的宽波段饱和吸收体材料。报道了一种基于金纳米棒饱和吸收体的 $1\ \mu\text{m}$ 波段被动调 Q 固体激光器。将金纳米棒溶液旋涂于输出镜上, 并将其作为可饱和吸收体构建到激光谐振腔中, 在 LD 端面抽运 Nd:YVO₄ 激光器中实现了 1064 nm 被动调 Q 运转。在抽运功率为 7.5 W 时获得了平均输出功率为 540 mW, 最小脉冲宽度为 138 ns, 重复频率为 602 kHz 的脉冲激光输出。

关键词 激光器; 金纳米棒; 被动调 Q; $1\ \mu\text{m}$ 波段

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0703021

Passively Q-Switched $1\ \mu\text{m}$ Solid-State Laser Using Gold Nanorod as Saturable Absorber

Huang Haitao^{1,3}, Li Min¹, Jin Lin¹, Wang Hui¹, Liu Pian¹, Shen Deyuan²

¹School of Physics and Electronic Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

²Department of Optical Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China;

³Jiangsu Key Laboratory of Advanced Laser Materials and Devices, Xuzhou, Jiangsu 221116, China

Abstract Benefiting from the surface plasmon resonance effect, the gold nanorod saturable absorber possesses the properties of tunable broadband of saturable absorption and fast nonlinear response. It can also easy integrate with a variety of laser resonators, making it a promising saturable absorber with a wide broadband. The passively Q-switched $1\ \mu\text{m}$ solid-state laser using gold nanorods as saturable absorbers is demonstrated. The gold nanorods are directly spin coated on the output coupler, and introduced in the laser resonator as saturable absorbers. Passively Q-switched operation of a LD pump Nd:YVO₄ laser at 1064 nm is realized accordingly. The pulsed laser output with a maximum average output power of 540 mW, a minimum pulse width of 138 ns, and a pulse repetition rate of 602 kHz are achieved when the pump power is 7.5 W.

Key words lasers; gold nanorods; passive Q-switched; $1\ \mu\text{m}$ wave band

OCIS codes 140.3540; 160.4236; 140.3480

1 引 言

以石墨烯、黑磷等为代表的二维材料具有光电属性可调控、工作波段宽等优点, 不断丰富着饱和吸收体的材料体系, 探索其在超快光子学领域的应用潜力是当前激光技术领域的重要研究方向之一^[1-3]。由于表面等离子共振(SPR)效应, 贵金属纳米颗粒具有丰富而独特的物理特性, 可以在纳米尺度上实现对光的多种性质的调控和利用。SPR 效应发生时, 外部光场向纳米金属颗粒中耦合的效率最高、电子受迫振荡具有最大的振幅、金属颗粒表面积聚着极高的能量, 此时可以显著增强包含非线性饱和吸收效应在内的各种光与物质相互作用过程的强度和效率, 使其在超快光子学、生物医学及新能源领域具备广阔的应用前景^[4-5]。

收稿日期: 2017-01-09; 收到修改稿日期: 2017-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(61308047, 61605068)

作者简介: 黄海涛(1984—), 男, 博士, 副教授, 主要从事固体激光器件与技术方面的研究。E-mail: hht840211@163.com

在众多贵金属纳米颗粒中,金纳米棒(GNRs)因其独特的依赖于形貌的各向异性的光学性质,成为国内外广泛研究的热点纳米材料之一^[6]。金纳米棒由于结构的各相异性,可以产生两个 SPR 模式,即横向 SPR 和纵向 SPR 模式。横向 SPR 由垂直于棒轴向的电子共振产生,其 SPR 吸收峰位于可见光波段,位置变化较小且强度较弱;纵向 SPR 由沿着纳米棒轴向的电子共振产生,调节棒的长径比可以实现纵向 SPR 峰在可见-近红外较宽波段内移动,且其强度远高于横向 SPR 模式。研究表明,纵向 SPR 的共振波长 λ_{\max} 与纳米棒的长径比 R 存在以下关系 $\lambda_{\max} = 95R + 420$ ^[7-9]。随着长径比的增大,纵向 SPR 红移量加大,并且线宽加宽。另外,金纳米棒还具备非线性响应时间快的特点,其典型的恢复时间在几皮秒量级^[10]。这些特性为金纳米棒用作宽波段饱和吸收体提供了可能。

到目前为止,研究人员将纳米金用作饱和吸收体材料,已经成功在光纤激光器中实现了运转方式从调 Q 到锁模、波长范围为 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 、脉冲宽度从微秒到飞秒量级、脉冲重复频率从千赫兹到兆赫兹的脉冲激光运转^[11-12]。在固体激光领域,2012 年,德国马普所的研究人员理论研究了纳米金饱和吸收体在可见光波段固体锁模激光器中的应用,展示了其在飞秒脉冲产生方面的潜能^[13]。2015 年,本课题组在 LD 侧面抽运 Nd:YAG 固体激光器中实现了基于纳米金饱和吸收体的被动调 Q 激光运转,获得了最大单脉冲能量为 $19 \mu\text{J}$ 、最小脉冲宽度为 $3.1 \mu\text{s}$ 的 1064 nm 激光脉冲输出^[14];进一步采用平均长径比为 15 的金纳米棒作为饱和吸收体,在 LD 端面抽运 $2 \mu\text{m}$ Tm:YAG 激光器中实现了纳秒量级调 Q 脉冲运转,最大单脉冲能量为 $4.94 \mu\text{J}$,相应的脉冲宽度和重复频率分别为 896 ns 和 77 kHz ^[15]。2015 年,山东大学和新加坡南洋理工大学的研究人员制备了可见光波段响应的金纳米棒(长径比约为 1.5)饱和吸收体,并在 LD 端面抽运 Pr:GdLiF₄ 激光器中实现了调 Q 激光运转。通过选择不同的输出耦合镜,分别实现了 $605, 639, 721 \text{ nm}$ 脉冲激光输出,最小脉冲宽度分别为 $237, 152, 318 \text{ ns}$,相应的重复频率分别为 $323, 571, 255 \text{ kHz}$ ^[16]。2016 年,山东师范大学的研究人员研究了金纳米双锥的饱和吸收特性,并成功实现了 1064 nm Nd:YVO₄ 激光器的调 Q 运转,输出的最小脉冲宽度为 396 ns ,重复频率为 90.6 kHz ,单脉冲能量为 $1.67 \mu\text{J}$ ^[17]。

根据已报道的实验结果,激光器设计对基于金纳米棒饱和吸收体的被动调 Q 固体激光器的脉冲输出特性影响较大。LD 侧面抽运结构可以支持大能量微秒脉冲运转,而 LD 端面抽运结构则可以获得纳秒级短脉冲输出。根据应用需求,探索不同工作波长,不同抽运结构下金纳米棒饱和吸收体的运转性能是一个有意义的研究课题。本文利用金纳米棒作为饱和吸收体,在 LD 端面抽运 Nd:YVO₄ 激光器中实现了 1064 nm 被动调 Q 运转,最大输出功率为 540 mW ,最小脉冲宽度为 138 ns ,重复频率为 602 kHz 。

2 实验装置

如图 1 所示,实验中使用的抽运源为光纤耦合的半导体激光器,中心波长为 808 nm ,最大输出功率为 30 W ,光纤芯径为 $400 \mu\text{m}$,数值孔径为 0.22。准直聚焦系统的焦距为 25 mm ,聚焦光斑比为 $1:1$,耦合效率约为 95% 。抽运光束经平全反镜 M1 进入激光晶体, M1 镀膜一面对 808 nm 减反,另一面对 808 nm 增透、对 1064 nm 全反。输出耦合镜为平平镜(M2),对 1064 nm 激光透过率为 5% 。整个谐振腔长度为 30 mm 。实验中所用的 Nd:YVO₄ 晶体 a 轴切割,尺寸为 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,原子数分数为 0.5% 。两端面镀 808 nm 和 1064 nm 减反膜。将晶体用铝箔包裹后放入水冷热沉中,保持较好的热接触。用恒温循

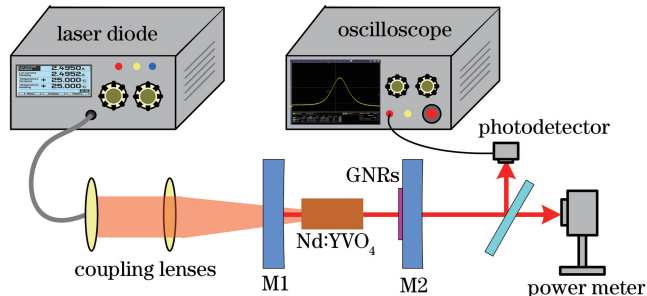


图 1 基于 GNRs 饱和吸收体的 LD 抽运 Nd:YVO₄ 调 Q 激光器示意图

Fig. 1 Schematic of the GNRs-based LD-pump passively Q-switched Nd:YVO₄ laser

环器控制循环水的温度,实验中温冷却水温度为 18 °C。实验中所用的金纳米棒采用无种子法制备^[11],其平均长径比为 7.3,理论计算的最大 SPR 波长为 1113.5 nm,可以覆盖 Nd:YVO₄ 晶体 1064 nm 的发射峰。将金纳米棒溶液直接旋涂于输出镜上(5%透过率),并在室温下干燥 24 h。经分光光度计测量,该输出镜旋涂金纳米棒后其透过率降为 3.6%,该透过率下降(1.4%)由金纳米棒的可饱和吸收损耗和非饱和吸收损耗组成,表明金纳米棒饱和吸收体的调制深度小于 1.4%。波形记录仪器由一台数字示波器(DSO9104H, Keysight, 美国)和一个光电接收器组成(Det10A/M, Thorlabs, 美国),激光器输出功率由功率计(S310C, Thorlabs, 美国)测量。

3 实验结果与讨论

对于被动调 Q 激光器,其输出脉冲宽度正比于腔内光子寿命,故在满足调 Q 第二阈值条件的前提下尽量缩短腔长有利于获得更短的脉冲宽度。根据文献报道,金纳米棒在近红外波段的吸收截面为 10⁻¹⁵ ~ 10⁻¹³ cm² 量级,远大于 Nd:YVO₄ 在 1064 nm 处的发射截面(25 × 10⁻¹⁹ cm²),因此无需通过腔内聚焦方式满足第二阈值条件,采用短腔即可实现有效的调 Q 运转^[18-19]。

图 2 给出了平均输出功率随着抽运功率的变化关系,插图为最大平均输出功率下的输出光谱。激光器在阈值附近即实现稳定脉冲输出,在 7.5 W 的抽运功率下,最大平均输出功率为 540 mW,输出光谱的中心波长为 1064 nm。图 3 给出了调 Q 脉宽与脉冲重复频率随抽运功率的变化关系。调 Q 脉宽在所给出的抽运功率范围内呈减小的趋势,增加抽运功率将有助于提高激光晶体内部的初始反转粒子数密度,而初始反转粒子数的增加将有效减小脉冲的上升时间,进而使整个脉冲得以压缩。重复频率随着抽运功率的增加而增加。抽运功率的增加将加速激光上能级反转粒子数的积累和消耗这两个过程,从而可以在较短的时间内产生更多的脉冲。在抽运功率为 7.5 W 时,获得了脉宽为 138 ns,重复频率为 602 kHz 的脉冲激光输出,这是目前基于金纳米棒饱和吸收体被动调 Q 的激光器获得的最短脉冲,进一步表明了金纳米棒是一种有潜力的饱和吸收体材料。

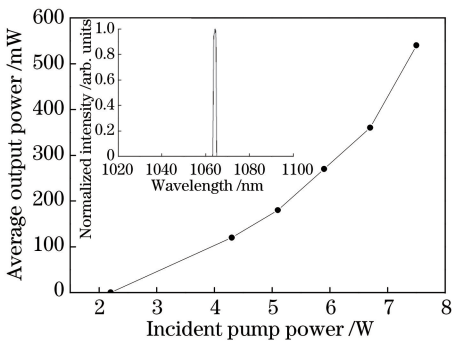


图 2 平均输出功率随抽运功率的变化关系
Fig. 2 Average output power versus pump power

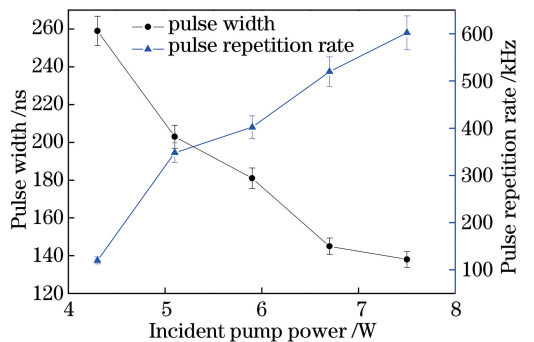


图 3 脉冲宽度及重复频率随抽运功率的变化关系
Fig. 3 Pulse width and pulse repetition rate versus pump power

图 4(a)和 4(b)分别给出了最短脉冲的波形图及相应的脉冲序列图。金纳米棒饱和吸收体将部分入射光能转化为热能,激光脉冲的加热效应会导致金纳米棒的饱和吸收强度降低。当抽运功率增加时,由金纳米棒饱和吸收体引入的损耗调制呈现动态减小的趋势,从而引起脉冲序列强度出现起伏。选择合适的金纳米棒沉积基质可以改善其与周围介质的热交换过程,从而实现高抽运功率下稳定的脉冲运转。

需要特别指出的是,将金纳米棒作为腔内饱和吸收体与将其置于腔外使用有显著的不同。定性来看,激光加热效应会导致金纳米棒 SPR 响应强度降低,当其置于激光谐振腔外时,金纳米棒只能被动吸收激发光能量,而不会对激光脉冲产生反馈效应;但是当其作为腔内饱和吸收体时,激光加热导致的 SPR 响应强度降低,导致饱和吸收体调制深度的降低,这将对腔内激光脉冲形成过程产生反馈作用,进一步调节脉冲的宽度及强度。因此,基于腔内饱和吸收体的脉冲产生过程是一个涉及激光加热与脉冲参数自调节的动态平衡过程。

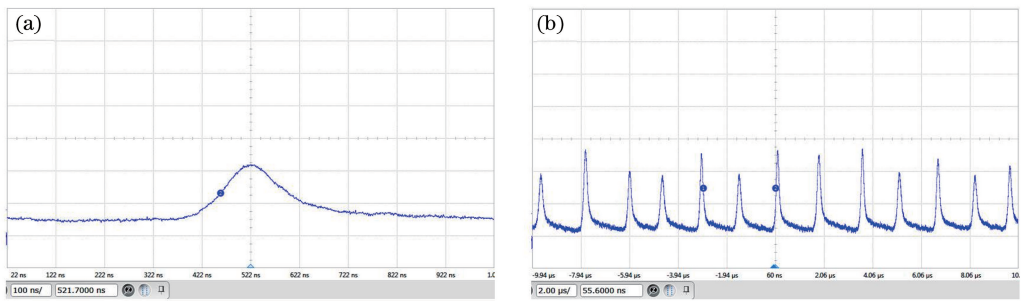


图 4 (a)最短脉冲的波形图;(b)相应脉冲序列图

Fig. 4 (a) Pulse waveform of the shortest pulse; (b) corresponding pulse train

4 结 论

成功实现了基于金纳米棒饱和吸收体的 LD 端面抽运 Nd:YVO₄ 被动调 Q 激光运转。将金纳米棒溶液旋涂于输出镜上,并将其作为可饱和吸收体构建到激光谐振腔中,实现了 1064 nm 被动调 Q 运转。研究了平均输出功率、脉冲宽度及重复频率随抽运功率的变化关系,在抽运功率为 7.5 W 时获得了平均输出功率为 540 mW,最小脉冲宽度为 138 ns,重复频率为 602 kHz 的脉冲激光输出,这是目前基于金纳米棒饱和吸收体被动调 Q 激光器中获得的最短脉冲,进一步表明了金纳米棒是一种有潜力的饱和吸收体材料。

参 考 文 献

- [1] Hu Tonghuan, Jiang Guobao, Chen Yu, *et al.* Passive harmonic mode-Locking in Er-doped fiber laser based on mechanical exfoliated graphene saturable absorber[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0802013.
胡同欢, 蒋国保, 陈宇, 等. 机械剥离石墨烯被动谐波锁模掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0802013.
- [2] Ren Jun, Wu Sida, Cheng Zhaochen, *et al.* Mode-locked femtosecond erbium-doped fiber laser based on graphene oxide versus semiconductor saturable absorber mirror[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0602013.
任军, 吴思达, 程昭晨, 等. 基于氧化石墨烯与半导体可饱和吸收镜的锁模飞秒掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0602013.
- [3] Liu Jinghui, Tian Jinrong, Hu Mengting, *et al.* Q-switched Yb:KGW laser based on topological insulators[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0802004.
刘京徽, 田金荣, 胡梦婷, 等. 基于拓扑绝缘体的 Yb:KGW 调 Q 激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0802004.
- [4] Listed N. A small world full of opportunities[J]. Nature Materials, 2010, 9(3): 181.
- [5] Zijlstra P, Chon J W, Gu M. Five-dimensional optical recording mediated by surface plasmons in gold nanorods[J]. Nature, 2009, 459(7245): 410-413.
- [6] Huang X, Neretina S, El-Sayed M A. Gold nanorods: from synthesis and properties to biological and biomedical applications[J]. Advanced Materials, 2009, 21(48): 4880-4910.
- [7] Link S, Mohamed M B, El-Sayed M A. Simulation of the optical absorption spectra of gold nanorods as a function of their aspect ratio and the effect of the medium dielectric constant[J]. Journal of Physical Chemistry B, 1999, 103(16): 3073-3077.
- [8] Yan B, Wang Y. Comment on "Simulation of the optical absorption spectra of gold nanorods as a function of their aspect ratio and the effect of the medium dielectric constant"[J]. Journal of Physical Chemistry B, 2003, 107(34): 9159.
- [9] Link S, El-Sayed M A. Correction on "Simulation of the optical absorption spectra of gold nanorods as a function of their aspect ratio and the effect of the medium dielectric constant"[J]. Journal of Physical Chemistry B, 2005, 109(20): 10531-10532.
- [10] Elim H I, Yang J, Lee J Y, *et al.* Observation of saturable and reverse-saturable absorption at longitudinal surface plasmon resonance in goldnanorods[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(8): 083107.
- [11] Kang Z, Gao X, Zhang L, *et al.* Passively mode-locked fiber lasers at 1039 and 1560 nm based on a common gold nanorod saturable absorber[J]. Optical Materials Express, 2015, 5(4): 794-801.
- [12] Kang Z, Liu M Y, Gao X J, *et al.* Mode-locked thulium-doped fiber laser at 1982 nm by using a gold nanorods saturable absorber[J]. Laser Physics Letters, 2015, 12(4): 045105.

- [13] Kim K H, Griebner U, Herrmann J. Theory of passive mode locking of solid-state lasers using metal nanocomposites as slow saturable absorbers[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(9): 1490-1492.
- [14] Huang H T, Li M, Wang L, *et al.* Gold nanorods as single and combined saturable absorbers for a high-energy Q-switched Nd:YAG solid-state laser[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(4): 4501210.
- [15] Huang H, Li M, Liu P, *et al.* Gold nanorods as the saturable absorber for a diode-pumped nanosecond Q-switched 2 μm solid-state laser[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(12): 2700-2703.
- [16] Wang S, Zhang Y, Xing J, *et al.* Nonlinear optical response of Au nanorods for broadband pulse modulation in bulk visible lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(16): 161103.
- [17] Zhang H, Liu J. Gold nanobipyramids as saturable absorbers for passively Q-switched laser generation in the 1.1 μm region[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(6): 1150-1152.
- [18] Kang Z, Xu Y, Zhang Y, *et al.* Passively mode-locking induced by gold nanorods in erbium-doped fiber lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(4): 041105.
- [19] Fan D, Mou C, Bai X, *et al.* Passively Q-switched erbium-doped fiber laser using evanescent field interaction with gold-nanosphere based saturable absorber[J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 18537-18542.