

文章编号: 1000-7032(2013)12-1631-05

基于金纳米棒可饱和吸收体的被动调 Q 掺铒光纤激光器

许 阳, 康 喆, 贾志旭, 刘 来, 赵 丹, 秦冠仕*, 秦伟平*

(集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区 吉林大学电子科学与工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要: 利用种子诱导生长法制备了长径比为 5 的金纳米棒, 测量了它的吸收谱, 结果表明该纳米棒具有较宽的吸收带(800 ~ 1 600 nm)。进一步测量了它的非线性吸收性质, 结果表明它在 1.56 μm 波长处具有可饱和吸收特性, 有望被用于实现被动调 Q 脉冲激光的输出。将该可饱和吸收体置于掺铒光纤激光器腔内, 当泵浦功率增至 30 mW 时开始有稳定的调 Q 脉冲激光输出, 输出激光的工作波长为 1.56 μm 。当泵浦功率为 205 mW 时, 可获得的最大输出功率约 6.9 mW, 脉冲能量达 219 nJ。研究结果表明, 这种新型可饱和吸收体在脉冲激光领域具有广阔的应用前景。

关键词: 金纳米棒; 非线性光学; 光纤激光器; 被动调 Q

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20133412.1631

Passively Q -switched Er-doped Fiber Lasers by Using Gold Nanorods as Saturable Absorbers

XU Yang, KANG Zhe, JIA Zhi-xu, LIU Lai, ZHAO Dan, QIN Guan-shi*, QIN Wei-ping*

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science & Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

* Corresponding Author, E-mail: qings@jlu.edu.cn; upqin@jlu.edu.cn

Abstract: The Au Nano-ropes (AuNRs) with aspect ratio of ~ 5 were synthesized through seed-mediated growth. We measured the absorption spectrum of the AuNRs and the AuNRs had a broad absorption band (800 ~ 1 600 nm). Furthermore, we measured the nonlinear absorption of the AuNRs and the result indicated that the AuNRs could be used to realize saturable absorption around 1.56 μm . Therefore, passively Q -switching could be achieved by using them. By inserting the AuNRs into the Er-doped fiber laser cavity, stable Q -switched pulses were achieved for a threshold pump power of 30 mW, and the emission wavelength was 1.56 μm . The highest output power of about 6.9 mW and the pulse energy as high as 219 nJ were obtained when the pump power was increased to 205 mW. Our results show the AuNRs are promising saturable absorber (SAs) for pulsed lasers.

Key words: gold nanorods; nonlinear optics; fiber laser; passively Q -switching

收稿日期: 2013-08-15; 修订日期: 2013-10-14

基金项目: 国家自然科学基金(51072065, 61178073, 60908031, 60908001, 61077033)资助项目

作者简介: 许阳(1987-), 男, 山东济宁人, 主要从事光纤激光器方面的研究。

E-mail: xuyang1987311@163.com

1 引 言

近年来,光纤激光器由于其具有结构紧凑、阈值低、效率高、光束质量好等优点而备受关注。人们对于光纤激光器,尤其是脉冲光纤激光器进行了大量的研究^[1-5]。其中,调 Q 光纤激光器和锁模光纤激光器作为两种主要脉冲光纤激光器,在军事、通信、工业加工、生物医学等领域有着广阔的应用前景^[1-6]。与锁模激光器相比,调 Q 激光器具有结构更简单、成本更低等优点^[7]。调 Q 光纤激光器主要由主动和被动两种形式实现。其中,主动调 Q 由外加的调制器实现^[8],而被动调 Q 由可饱和吸收体实现。与主动调 Q 相比,被动调 Q 激光具有结构简单、可实现全光纤集成、稳定性好以及造价低廉等特点^[7,10-11]。目前,常用的可饱和吸收体有半导体可饱和吸收镜(Semiconductor saturable absorber mirror, SESAM)、石墨烯(Graphene)、碳纳米管(Carbon nanotube, CNT)等。2011年, D. Popa 等^[7]利用 Graphene 作可饱和吸收体在 $1.5\ \mu\text{m}$ 附近实现了脉宽为 $2\ \mu\text{s}$ 、脉冲能量为 $40\ \text{nJ}$ 的可调谐激光输出($1\ 522\sim 1\ 555\ \text{nm}$)。2012年, Weiqiang Yang 等^[10]利用 SESAM 作为可饱和吸收体在 $2\ \mu\text{m}$ 附近实现了 $91\ \text{mW}$ 平均功率、 $80\ \text{kHz}$ 重复频率、 $490\ \text{ns}$ 脉宽、 $1.14\ \mu\text{J}$ 单脉冲能量的激光输出。2012年, Lei Liu 等^[11]利用 CNT 作为可饱和吸收体在 $1.5\ \mu\text{m}$ 附近实现了重复频率 $23.8\sim 66.2\ \text{kHz}$ 、脉宽 $2.6\sim 9\ \mu\text{s}$ 、约 $0.5\ \text{nJ}$ 最高单脉冲能量的双波长脉冲激光输出。近些年来,对以上 3 种可饱和吸收体的研究已经相当广泛和深入。探索新型的可饱和吸收体对推动调 Q 激光技术的进一步发展具有重要意义。

本文报道了一种新的可饱和吸收体——金纳米棒(AuNRs),并通过将其集成于全光纤环形激光腔中实现了被动调 Q 掺铒光纤激光器。在 $205\ \text{mW}$ 泵浦功率下,获得了脉冲宽度为 $10\ \mu\text{s}$ 、平均输出功率为 $6.9\ \text{mW}$ 、单脉冲能量为 $219\ \text{nJ}$ 的激光输出。这种新型可饱和吸收体将会拓展调 Q 脉冲激光的研究范围,并推动脉冲激光技术的进一步发展。

2 实 验

AuNRs 由种子生长法^[13]制备。室温下,将

$10\ \text{mL}$ 浓度为 $0.5\ \text{mmol/L}$ 的氯金酸(HAuCl_4)溶液与 $10\ \text{mL}$ 浓度为 $0.2\ \text{mmol/L}$ 的十六烷基溴化铵(CTAB)混合,待混合液分散均匀后,加入 $1\ \text{mL}$ $0.2\ \text{mmol/L}$ 的硼氢化钠(NaBH_4)溶液并搅拌约 $10\ \text{min}$,此时溶液颜色由深黄色变为棕黄色。静置 $2\ \text{h}$ 后,便得到金种子溶液。室温下将 $12.5\ \text{mL}$ 浓度为 $0.2\ \text{mol/L}$ 的 5-溴水杨酸(5-bromosalicylic acid)溶液与 $20\ \text{mL}$ 浓度为 $0.05\ \text{mol/L}$ 的 CTAB 混合,同时加入 $2\ \text{mL}$ 浓度为 $4\ \text{mmol/L}$ 的硝酸银(AgNO_3)溶液,混合均匀后,将 $1\ \text{mL}$ 浓度为 $0.1\ \text{mmol/L}$ 的抗坏血酸(Vc)在连续搅拌的条件下加入混合液,以形成生长溶液。最后,将 $1\ \text{mL}$ 已制备的金种子溶液加入生长溶液中。将所制得的溶液室温下静置 $48\ \text{h}$ 以保证其能生长出 AuNRs。然后,将所得的 AuNRs 溶液与配好的质量分数为 1% 的成膜剂羧甲基纤维素钠(NaCMC)溶液混合,超声处理 $6\ \text{h}$ 使其混合均匀,得到金纳米棒-羧甲基纤维素钠(AuNRs-NaCMC)混合液。静置 $24\ \text{h}$ 后,将所得的 AuNRs-NaCMC 混合液涂于载玻片上,干燥后便得到金纳米棒可饱和吸收体薄膜。与光学性质各向同性的球形金纳米粒子相比^[6-15], AuNRs 为棒状结构,其光学性质并非各向同性,因而存在由横向等离子共振和纵向等离子共振产生的两个吸收峰。此处我们用到的为其纵向吸收峰。另外,通过改变金纳米棒的长径比,可以使其吸收峰在可见波段到红外波段的宽范围内移动^[13,15-16]。

图 1(a) 为金纳米棒的透射电镜(Transmission electron microscope, TEM)图,图 1(b) 为其吸收谱。通过图 1(a) 可以看到,样品形貌为棒状,长度约为 $100\ \text{nm}$,直径约为 $20\ \text{nm}$,长径比约为 5。从图 1(b) 可以看出, AuNRs 由纵向等离子共振产生的吸收峰具有极宽的吸收带($800\sim 1\ 600\ \text{nm}$),因此其能够在 $1.56\ \mu\text{m}$ 附近实现调 Q 激光脉冲输出。图 1(c) 为测得的金纳米棒的归一化激光透过率与泵浦功率密度的关系(泵浦源为输出脉冲宽度 $500\ \text{fs}$ 、中心波长 $1\ 560\ \text{nm}$ 的脉冲光纤激光器),展示了金纳米棒的可饱和吸收性。数据显示金纳米棒的调制深度约为 4.5% ,饱和功率密度约为 $1.67\ \text{MW}/\text{cm}^2$ 。

本实验所用的实验装置如图 2 所示。在实验中,我们采用环形光纤激光腔结构。所用的泵浦源是 $976\ \text{nm}$ 半导体激光器($976\ \text{nm}$ pump LD),

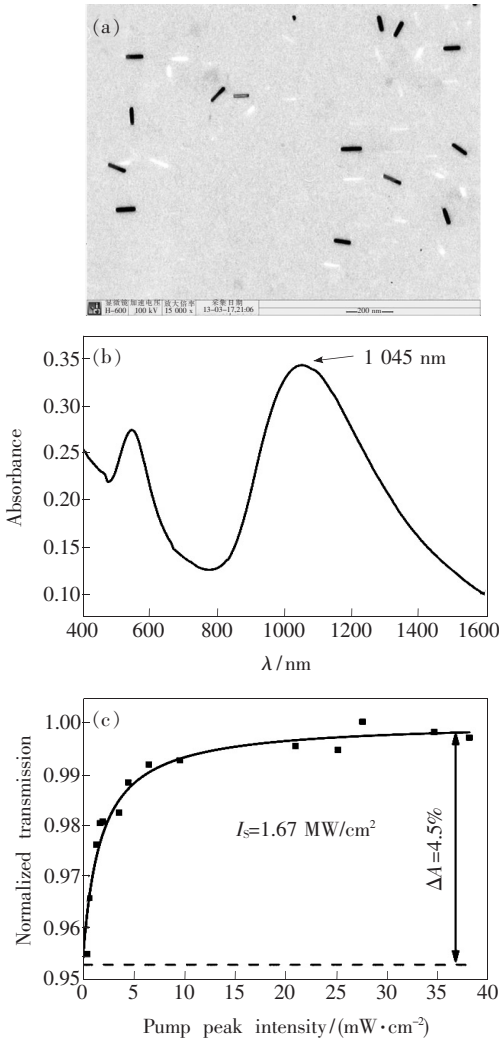


图 1 (a) 金纳米棒 TEM 图; (b) 金纳米棒吸收谱; (c) 金纳米棒归一化激光透过率与泵浦功率密度的关系。

Fig. 1 (a) TEM image of the AuNRs. (b) Optical absorption spectrum of the AuNRs. (c) Dependence of the normalized transmission at 1 560 nm on the pump power density for the AuNRs.

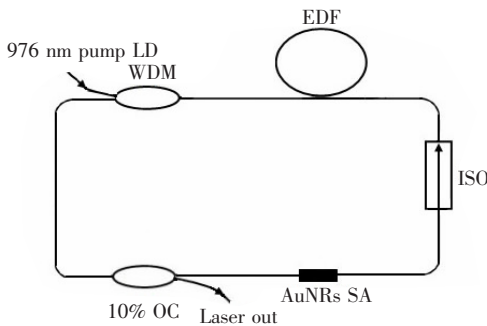


图 2 金纳米棒被动调 Q 掺铒光纤激光器实验装置图

Fig. 2 Schematic setup of AuNRs passively Q-switched erbium-doped fiber laser

通过一个 980/1 550 nm 波分复用器(WDM)将泵浦光耦合进激光腔内。所用的增益介质为一段 20 cm 的高掺杂掺铒光纤(EDF)。所用的可饱和吸收体为 AuNRs-NaCMC 混合薄膜。激光腔中的 1 550 nm 隔离器(ISO)是为了保证光在腔内单方向传输。利用一个 1 550 nm 的 10 dB 耦合器(10% OC)来输出脉冲激光。

3 结果与讨论

激光器搭建完毕后,调整 976 nm 半导体激光器泵浦功率,当泵浦功率增至 30 mW 时,开始出现稳定的调 Q 脉冲。继续增加泵浦功率,直至约 205 mW,激光器依然能保持稳定的调 Q 激光输出。图 3 给出了泵浦功率约为 80 mW 时的输出脉冲序列以及单个输出脉冲。此时脉冲重复频率约为 17.5 kHz (对应脉冲间隔约 57 μs),脉冲宽度约为 16 μs。图 4 给出了输出激光的光谱,激光中心波长约为 1 560 nm。连续激光经可饱和吸收体调制为调 Q 脉冲激光后,激光脉冲的窄化对应频域的展宽,故所得脉冲光谱宽度与连续激光相比有较明显的展宽。

图 5 给出了输出激光脉冲宽度及重复频率与泵浦功率的关系。当泵浦功率为 30 mW 时,脉冲

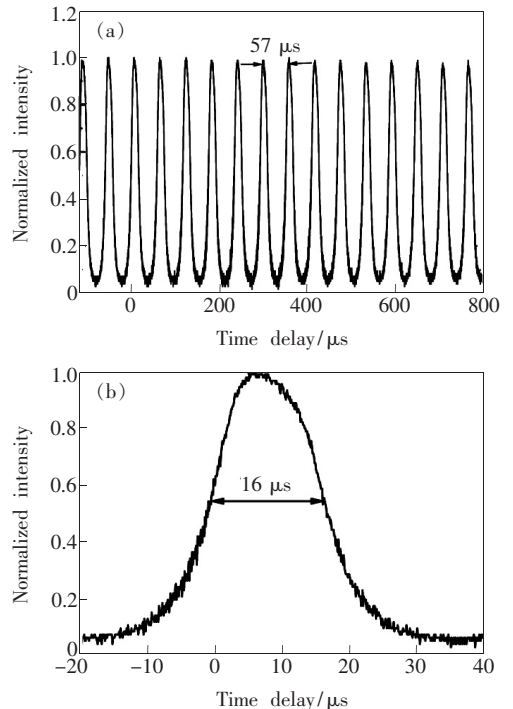


图 3 (a) 输出脉冲序列; (b) 单个输出脉冲。

Fig. 3 (a) Output pulse train of the laser. (b) Single pulse profile of the laser.

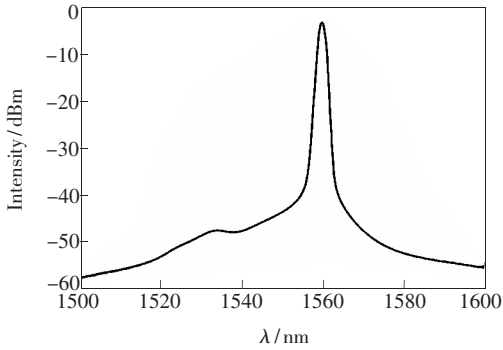


图 4 激光器输出光谱

Fig. 4 Emission spectrum of the laser

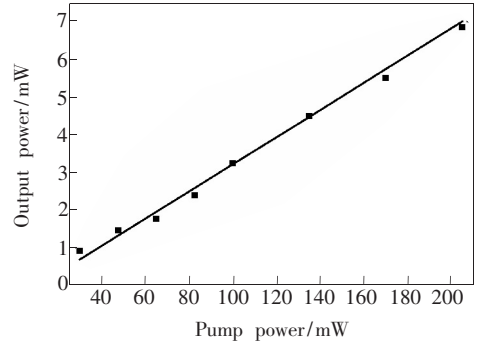


图 6 激光器输出功率随泵浦功率的变化

Fig. 6 Out power of the laser as a function of the pump power

宽度约为 $20 \mu\text{s}$, 重复频率约 6.6 kHz ; 随着泵浦功率增至 205 mW , 脉冲宽度下降至约 $10 \mu\text{s}$, 而重复频率增至约 31.5 kHz 。输出脉冲宽度随泵浦功率的增大而减小, 而重复频率随泵浦功率的增大而提高是被动调 Q 激光器的典型特征^[11], 这是由泵浦速率随着泵浦功率的增大而提高引起的^[6]。图 6 为激光器输出功率随泵浦功率的变化图。由图 6 可知, 该激光器的光-光转换效率约为 3.6% 。随着泵浦功率自 30 mW 增至 205 mW , 输出功率由约 1 mW 增至约 6.9 mW , 所对应的单个脉冲能量最高达 219 nJ 。

在制作 AuNRs 可饱和吸收体时, 我们加入了成膜剂 NaCMC。为了确保调 Q 是由 AuNRs 实现, 我们只将 NaCMC 薄膜置于激光腔中, 观察其输出光谱及脉冲。图 7(a) 和图 7(b) 分别为泵浦功率升至 205 mW 时所得的输出光谱以及输出激光的示波器显示, 可以看到只有连续光的输出而没有任何形式脉冲光的输出, 这证实了我们所得到的调 Q 激光输出由 AuNRs 实现。

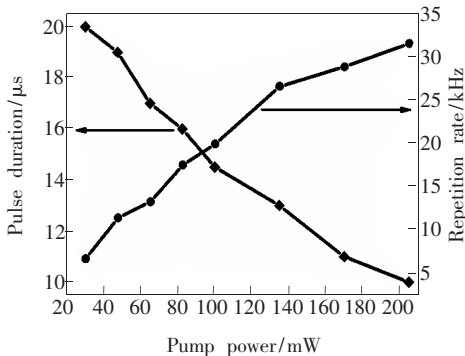


图 5 输出脉冲宽度和重复频率随泵浦功率的变化

Fig. 5 Dependence of the pulse duration and repetition rate on the pump power

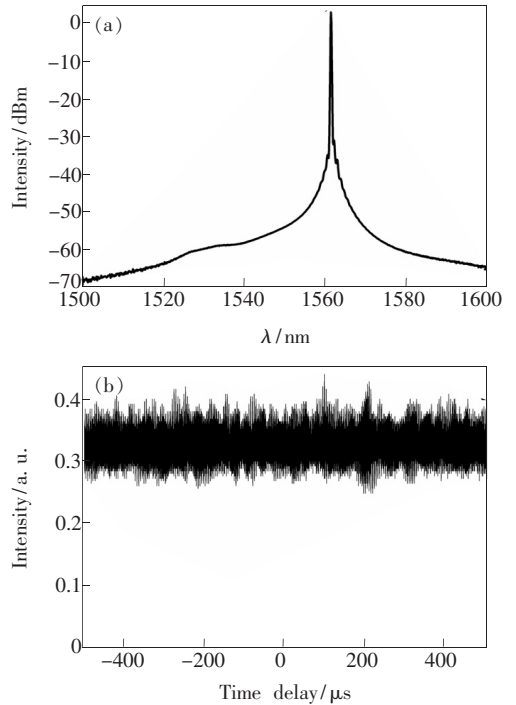


图 7 (a) 只将 NaCMC 薄膜置于腔中时的输出光谱; (b) 只将 NaCMC 薄膜置于腔中时输出激光的示波器显示。

Fig. 7 (a) Emission spectrum of the EDFL with a bare NaCMC film. (b) Output laser of the EDFL with a bare NaCMC film.

4 结 论

利用种子诱导生长法制备了长径比为 5 的金纳米棒, 实现了基于新型可饱和吸收体——金纳米棒的被动调 Q 掺铒光纤激光器, 得到了阈值为 30 mW 的稳定调 Q 激光输出。当泵浦功率增至 205 mW 时, 输出最大平均功率约为 6.9 mW , 单脉冲能量高达 219 nJ 。此外, 由于金纳米棒吸收峰位置与其长径比的依赖性, 金纳米棒有潜力成为覆盖多个波段的新颖可饱和吸收体。

参 考 文 献:

- [1] Liu J, Wu S D, Wang K, *et al.* Passively mode-locked and Q-switched Yb-doped fiber lasers with graphene-based saturable absorber [J]. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2011, 38(8):0802001-1-5 (in Chinese).
- [2] Xing L, Feng X, Zhang L, *et al.* Stimulated Brillouin scattering hybrid Q-switched Er-doped fiber laser [J]. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2008, 35(3):338-342 (in Chinese).
- [3] Liu L, Cui J W, Li W J, *et al.* Yb³⁺-doped double-clad quasi-continuous wave fiber laser pumped by laser diode [J]. *Chin. Opt.* (中国光学), 2012, 5(6):663-670 (in Chinese).
- [4] Mei Y S, Fu X H, Yang Y L. Design and preparation of optical films for fiber lasers [J]. *Chin. Opt.* (中国光学), 2011, 4(3):299-304 (in Chinese).
- [5] Feng D J, Huang W Y, Ji P Y, *et al.* Erbium-doped fiber ring cavity pulsed laser based on graphene saturable absorber [J]. *Opt. Precision Eng.* (光学精密工程), 2013, 21(5):1097-1101 (in Chinese).
- [6] Jiang T, Xu Y, Tian Q J, *et al.* Passively Q-switching induced by gold nanocrystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 101:151122-1-4.
- [7] Popa D, Sun Z, Hasan T, *et al.* Graphene Q-switched, tunable fiber laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 98(7):073106-1-3.
- [8] Escalante-Zarate L, Barmenkov Y O, Kolpakov S A, *et al.* Smart Q-switching for single-pulse generation in an erbium-doped fiber laser [J]. *Opt. Exp.*, 2011, 20(4):4397-4402.
- [9] Wang Z P, Cheng X F, Han S J, *et al.* Actively Q-switched pulse laser from LD end-pumped Nd:LiGd(MoO₄)₂ crystals [J]. *Opt. Precision Eng.* (光学精密工程), 2013, 21(4):835-840 (in Chinese).
- [10] Yang W Q, Hou J, Zhang B, *et al.* Semiconductor saturable absorber mirror passively Q-switched fiber laser near 2 μm [J]. *Appl. Opt.*, 2012, 51(23):5664-5667.
- [11] Liu L, Zheng Z, Zhao X, *et al.* Dual-wavelength passively Q-switched erbium doped fiber laser based on an SWNT saturable absorber [J]. *Opt. Commun.*, 2012, 294:267-270.
- [12] Kuang Q Q, Sang M H, Nie Y Y, *et al.* Research on rational harmonic mode-locked phenomenon of passively mode-locked erbium-doped fiber laser [J]. *Opt. Precision Eng.* (光学精密工程), 2009, 17(11):2719-2723 (in Chinese).
- [13] Pan B F, Cui D X, XU P, *et al.* Preparation of gold nanorods with aspect ratio 2-5 by using seed mediated growth method [J]. *J. Mat. Sci. Eng.* (材料科学与工程学报), 2007, 25(3):333-335 (in Chinese).
- [14] Yang C E, Zhou J, Li X, *et al.* Surface enhanced Raman scattering characteristics of gold-nanoparticles-doped DNA-CTMA-DPFP film [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2013, 34(3):383-387 (in Chinese).
- [15] Ke S L, Kan C X, Mo B, *et al.* Research progress on the optical properties of gold nanorods [J]. *Acta Phys. -Chim. Sinica* (物理化学学报), 2012, 28(6):1275-1290 (in Chinese).
- [16] Wang T Y, Halaney D, Ho D, *et al.* Two-photon luminescence properties of gold nanorods [J]. *Biomed. Opt. Exp.*, 2013, 4(4):584-595.