

碳基吸收体被动锁模大功率皮秒激光器

王勇刚¹ 曲遵世² 刘杰² 曾远康¹

¹香港理工大学应用物理系, 香港
²山东师范大学物理与电子学院, 山东 济南 250014

摘要 采用垂直蒸发法分别在玻璃和石英衬底上淀积单壁碳纳米管和氧化石墨烯材料来制作碳基可饱和吸收体。利用单壁碳纳米管作为饱和吸收体, 实现了 Nd:YVO₄ 激光器被动锁模, 最高输出功率为 3.6 W, 斜率效率为 31%, 脉冲宽度为 7.6 ps, 重复频率为 75 MHz。利用氧化石墨烯作为可饱和吸收体, 实现了 Nd:GdVO₄ 激光器被动锁模, 最大输出功率为 1.1 W, 斜率效率为 11.3%, 脉冲宽度为 4.5 ps, 重复频率为 70 MHz。

关键词 激光器; 碳纳米管; 氧化石墨烯; 锁模; 大功率; 固体激光器

中图分类号 TN248 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0702001

High Power Picosecond Lasers Mode Locked with Carbon Based Absorbers

Wang Yonggang¹ Qu Zunshi² Liu Jie² Yuen Hong Tsang¹

¹Department of Applied Physics and Materials Research Center, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China
²College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Ji'nan, Shandong 250014, China

Abstract Single walled carbon nanotubes and graphene oxide are deposited on glass and quartz by vertical evaporation method, respectively. By using single walled carbon nanotubes absorber, passively mode locked Nd:YVO₄ laser is obtained. The maximum output power is 3.6 W, the slope efficiency is 31%, the pulse duration is 7.6 ps and the repetition rate is 75 MHz. By using graphene oxide absorber, passively mode locked Nd:GdVO₄ laser is achieved. The maximum output power is 1.1 W, the slope efficiency is 11.3%, the pulse duration is 4.5 ps and the repetition rate is 70 MHz.

Key words lasers; carbon nanotubes; graphene oxide; mode locking; high power; solid-state laser

OCIS codes 140.3480; 140.3530; 140.4050; 320.7090; 140.7090; 140.3580

1 引 言

1992 年, Keller 等^[1] 发明半导体可饱和吸收镜, 在此之后, 各种类型的半导体可饱和吸收镜被广泛地用于固体和光纤激光器锁模^[2,3]。然而, 半导体可饱和吸收镜存在几个问题。它的恢复时间太长, 价格也显得略贵。此外, 半导体可饱和吸收镜适用的波长受限于材料。由于带宽很窄, 通常只有几十纳米, 所以要实现不同波长激光器的锁模需要改变设计和变更材料组分或者类型, 改变材料组分常常需要变更原材料类型, 甚至需要不同类型的生长

设备。因此, 人们迫切希望有工作波长更宽、恢复时间更短和制作成本更低的新颖锁模吸收体来替代半导体可饱和吸收镜。

因为具有独特的电学特性和其他特性, 碳纳米管得到广泛的应用^[4]。2005 年, 半导体型的碳纳米管被用于激光锁模^[5]。迄今为止, 已有超过 200 篇采用碳纳米管材料作为可饱和吸收体的单模光纤锁模激光器的文章发表。然而, 各种报道中却少见瓦级大功率锁模的报道。石墨烯是另一种碳基材料, 它是二维平面结构, 电学特性比碳纳米管更好。单

收稿日期: 2012-01-09; 收到修改稿日期: 2012-02-29

基金项目: 国家自然科学基金(61078032)和香港理工大学基金(G-YJ20)资助课题。

作者简介: 王勇刚(1973—), 男, 博士后, 主要从事半导体可饱和吸收镜、碳基可饱和吸收体方面的研究。

E-mail: chinawygxjw@hotmail.com

层石墨烯约能吸收 2.3% 的光。石墨烯没有带隙，它的吸收率和光波长关系不大。石墨烯的恢复时间很短，通常在 1 ps 以内。目前，也有不少采用石墨烯基吸收体的单模锁模光纤激光器报道，如石墨烯材料^[6]、石墨烯/聚合物混合物等^[7]。然而，脉冲激光的输出功率只有毫瓦量级^[6,7]。采用这类吸收体锁模的固体激光器输出功率可以达到 100 mW^[8] 甚至 360 mW^[9]，但是仍然远远不能和采用半导体可饱和吸收镜的锁模激光器相比较，后者的输出功率已经达到数十瓦。本文采用新型碳纳米管和氧化石墨烯(GO)吸收体^[10,11] 实现了瓦级大功率锁模激光器。利用单壁碳纳米管(SWCNT)作为饱和吸收体，实现了 Nd:YVO₄ 激光器被动锁模，最高输出功率为 3.6 W，脉冲宽度为 7.6 ps。利用氧化石墨烯作为可饱和吸收体，实现了 Nd:GdVO₄ 激光器被动锁模，最大输出功率为 1.1 W，脉冲宽度为 4.5 ps。

2 碳纳米管和氧化石墨烯吸收体的制作

碳纳米管材料由电弧放电法生长。单壁碳管的直径约 1.5 nm，长度分布在 1~5 μm 之间。单壁碳管经过 H₂SO₄/HNO₃ 处理，形成羟基官能团，因此可以溶于水。首先，将 10 mg 单壁碳管粉末放入盛有 10 mL 0.1% (质量分数) 十二烷基碳酸钠(SDS) 水溶液的容器中。这里 SDS 作为分散剂。为了使得分散效果更好，单壁碳管分散液超声 10 h。超声之后，将分散液进行离心。离心后，将离心管上部分散液注入到小瓶中备用。然后，将亲水处理过的玻璃基板垂直放入一个塑料容器内。将分散液稀释为不同的浓度后注入这个塑料容器然后放入烘箱中蒸发，烘箱保持在 40 °C。分散液烘干后，取出基板，碳管已经分布在基板两侧，可以作为吸收体使用了。氧化石墨烯吸收体的制作方法和碳纳米管吸收体类似。氧化石墨烯吸收体采用化学法制备的氧化石墨烯小片分散溶液来制作。氧化石墨烯小片为 1~3 个原子层的氧化石墨烯，是直径在 0.1~5 μm 的混合物。此外，氧化石墨烯吸收体使用的基板是石英，在大气下蒸发。

3 碳纳米管锁模 Nd:YVO₄ 激光器

Nd:YVO₄ 激光器锁模实验装置图如图 1 所示。抽运源是 808 nm 光纤耦合半导体激光器，芯径是 400 μm，数值孔径是 0.22。Nd:YVO₄ 的尺寸是 4 mm×4 mm×8 mm，Nd 的掺杂原子数分数是

0.5%。抽运光聚焦在 Nd:YVO₄ 晶体上，光斑面积为 200 μm。M₁, M₂ 的曲率半径分别为 500 mm 和 200 mm，M₁, M₂ 之间的间距为 78 cm。M₃ 为输出镜，透射率为 5%。

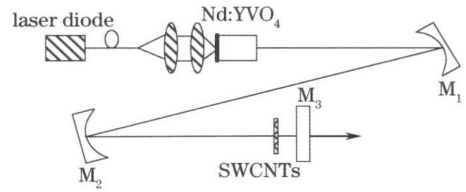


图 1 碳纳米管锁模激光器试验装置图
Fig. 1 Experimental setup of mode-locked laser with SWCNT absorber

图 2 是输入输出功率曲线。抽运功率小于 5 W 时为调 Q 锁模，抽运功率大于 5 W 时为连续锁模。抽运功率为 12 W 时最大激光输出功率 3.6 W，斜率效率为 31%。图 3 是纳秒和微秒尺度范围的锁模脉冲序列图。图 4 是自相关曲线，自相关仪为 FR-103XL, (Femtochrome, Research Inc.)。高斯拟合出的脉冲宽度为 7.6 ps。光谱宽度为 1.4 nm，相应的时间带宽积为 2.8，最大峰值功率和单脉冲能量分别为 4.74 kW 和 36 nJ。

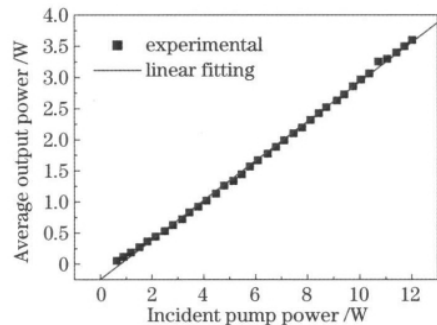


图 2 输出功率曲线
Fig. 2 Average output power as a function of pump power

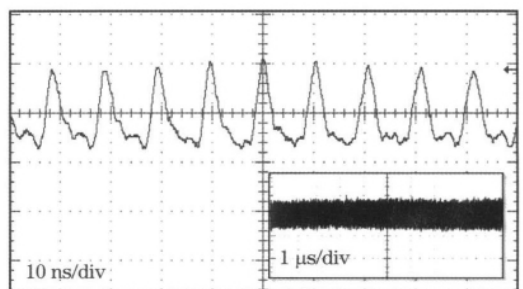


图 3 连续锁模脉冲序列
Fig. 3 Pulse train of the continuous wave mode-locked laser

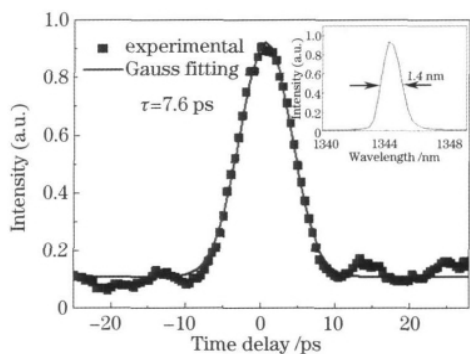


图 4 平均输出功率为 3.6 W 时的自相关曲线。

插图为光谱图

Fig. 4 Autocorrelation trace of the pulse with the average output power of 3.6 W. The inset is the optical spectrum

4 氧化石墨烯锁模 Nd:GdVO₄ 激光器

Nd:GdVO₄ 激光器锁模实验装置图如图 5 所示。抽运源是 808 nm 光纤耦合半导体激光器, 芯径为 400 μm, 数值孔径是 0.22。Nd:GdVO₄ 的尺寸是 4 mm×4 mm×8 mm, Nd 的掺杂原子数分数为 0.5%。氧化石墨烯吸收体上的光斑半径为 50 μm。L₁=150 mm, L₂=490 mm, L₃=1060 mm, L₄=290 mm。M₂, M₃, M₄ 的曲率半径分别为 200, 800, 500 mm; M₅ 为输出镜, 透射率为 5%。

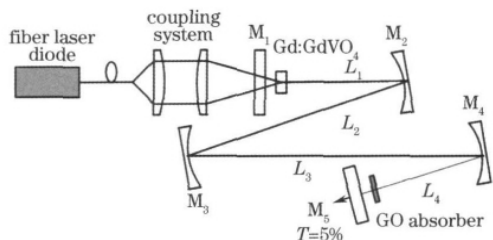


图 5 氧化石墨烯被动锁模激光器试验装置图

Fig. 5 Schematic configuration of the mode-locked laser with graphene oxide absorber

图 6 是脉冲宽度曲线, 测量的脉冲宽度为 4.5 ps。图 7 是光谱图, 锁模时的光谱宽度为 0.8 nm, 相应的时间带宽积为 0.96。图 8 是输入输出功率曲线和锁模脉冲序列图, 抽运功率小于 5.2 W 时为调 Q 锁模, 大于 5.2 W 时为连续锁模。当抽运功率为 10.4 W 时有最大输出功率 1.1 W, 斜率效率为 11.3%。激光脉冲重复频率为 70 MHz。

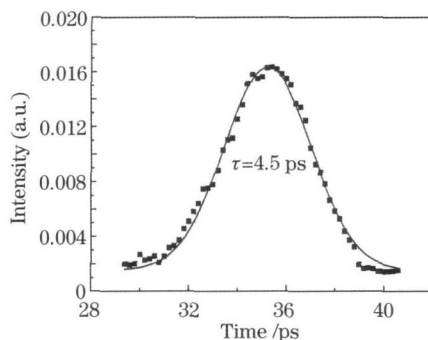


图 6 脉冲宽度

Fig. 6 Pulse duration

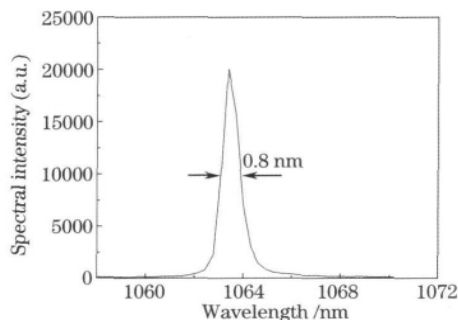


图 7 光谱图

Fig. 7 Corresponding optical spectrum

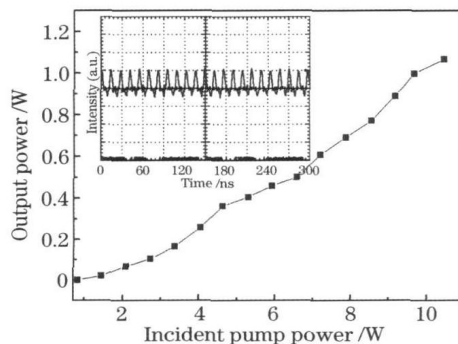


图 8 输出功率曲线。插图为脉冲序列图

Fig. 8 Output power versus pump power.

The inset is pulse train

5 结 论

碳纳米管和石墨烯两种材料是近年来出现的新颖锁模吸收体材料。目前, 这两类吸收体已经广泛应用于单模光纤激光器锁模。然而, 单模光纤锁模激光器输出功率只有毫瓦级, 应用领域非常有限。另一方面, 目前这两类吸收体多和聚合物混合, 很容易被大功率激光所破坏, 因此也不适合作为固体激光器锁模吸收体。此外, 石墨烯材料制作成本高, 生产速率慢。氧化石墨烯材料通常可以采用化学合成

的方法来制备,制作成本低,生产速率高。虽然氧化石墨烯是绝缘体,但是导电性并不影响其作为饱和吸收体。此外,氧化石墨烯溶于水而石墨烯不溶于水,这样氧化石墨烯在水溶液中的分散效果更好,原料利用率更高。本文尝试采用新型的垂直蒸发技术制作不含聚合物的单壁碳纳米管和氧化石墨烯吸收体,用这两种吸收体得到了瓦级的输出功率。目前,虽然工作的长期稳定性还不如半导体可饱和吸收镜,但是已经显示出替代半导体可饱和吸收镜的趋势。

参 考 文 献

- U. Keller, D. A. B. Miller, G. D. Boyd *et al.*. Solid-state low-loss intracavity saturable absorber for Nd:YLF lasers: an A-FPSA[J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(7): 505~507
- Chen Meng, Zhang Bingyuan, Li Gang *et al.*. Study on SESAM passively-mode-locked Nd:YAG laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6): 646~648
陈 檬, 张丙元, 李 港 等. 半导体可饱和吸收镜被动锁模 Nd:YAG 激光器的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(6): 646~648
- Li Xiao, Wang Yonggang, Zhang Shiqiang *et al.*. Passively mode-locked side-pumped Nd:YAG laser with SESAM[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3103~3107
李 宵, 王勇刚, 张世强 等. 半导体可饱和吸收镜被动锁模侧面抽运 Nd:YAG 激光器研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3103~3107
- S. Iijima. Helical microtubules of graphitic carbon[J]. *Nature*, 1991, **354**(6348): 56~58
- Y. Sakakibara, Aleksey, G. Rozhin *et al.*. Carbon nanotube-poly(vinylalcohol) nanocomposite film devices; applications for femtosecond fiber laser mode lockers and optical amplifier noise suppressors[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2005, **44**(4A): 1621~1625
- H. Zhang, D. Y. Tang, L. M. Zhao *et al.*. Large energy mode locking of an erbium-doped fiber laser with atomic layer graphene[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(20): 17630~17635
- Q. L. Bao, H. Zhang, J. X. Yang *et al.*. Graphene-polymer nanofiber membrane for ultrafast photonics[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2010, **20**(5): 782~791
- W. D. Tan, C. Y. Su, R. J. Knize *et al.*. Mode locking of ceramic Nd: yttrium aluminum garnet with graphene as a saturable absorber[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**(3): 031106
- J. L. Xu, X. L. Li, Y. Z. Wu *et al.*. Graphene saturable absorber mirror for ultra-fast-pulse solid-state laser[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(20): 1948~1950
- C. C. Liu, Y. G. Wang, J. Liu *et al.*. Ultrafast Yb:Y₂SiO₅ laser investigation based on a carbon nanotube absorber[J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(19): 3229~3232
- Qu Zunshi, Ma Baomin, Liu Jie. Research on pulse laser characteristics for 2 μm Tm:YAP laser based on carbon nanotube absorber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(11): 1102009
曲遵世, 马宝民, 刘 杰. 基于碳纳米管的 Tm:YAP 2 μm 脉冲激光特性实验研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(11): 1102009

栏目编辑:宋梅梅