

石墨烯实现 Nd:YVO₄ 激光器 1064 nm 和 1342 nm 双波长被动调 Q

梁 莉 林正怀 陈 狮 王加贤

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要 在激光二极管端面抽运的三腔复合镜 Nd:YVO₄ 双波长激光器中,通过合理配置两个支腔腔长和输出镜透射率,采用石墨烯分散液作为可饱和吸收体,实现 1064 nm 和 1342 nm 双波长激光被动调 Q。当 1064 nm 支腔透射率为 20% 时,获得脉宽为 10.8 ns 的 1064 nm 脉冲和脉宽为 12.5 ns 的 1342 nm 脉冲,1064 nm 脉冲在前,两脉冲峰值的时间间隔为 16 ns;当 1064 nm 支腔透射率为 25% 时,获得脉宽为 11.3 ns 的 1064 nm 脉冲和脉宽为 14.2 ns 的 1342 nm 脉冲,1342 nm 脉冲在前,两脉冲峰值的时间间隔为 19 ns。根据双波长谱线竞争理论和石墨烯对 1064 nm 和 1342 nm 激光的可饱和吸收特性,对上述实验结果给予了合理的理论解释。

关键词 激光器;双波长激光脉冲;石墨烯分散液;Nd:YVO₄ 激光器;被动调 Q

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0402009

Graphene Passively Q-Switching for Dual-Wavelength Lasers at 1064 nm and 1342 nm in Nd:YVO₄ laser

Liang Li Lin Zhenghuai Chen Shi Wang Jiexian

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China)

Abstract Passively Q-switching of dual-wavelength lasers at 1064 nm and 1342 nm is realized in a laser diode (LD) end-pumped three-mirror compound resonator Nd:YVO₄ laser using graphene dispersion as the saturable absorber, by setting the cavity lengths and the output mirror transmissivities of two branch cavity appropriately. When the transmissivity of 1064 nm branch cavity is 20%, both 1064 nm pulse with 10.8 ns duration and 1342 nm pulse with 12.5 ns duration are achieved, and the 1064 nm pulse is in the front, the time interval between two pulses is 16 ns. Both 1064 nm pulse with 11.3 ns duration and 1342 nm pulse with 14.2 ns duration are achieved when the transmissivity of 1064 nm branch cavity is 25%, and 1342 nm pulse is in the front, the time interval between two pulses is 19 ns. A reasonable theoretical explanation is given to the above-mentioned experiment according to dual-wavelength line competition and the saturable absorption of graphene in 1064 nm and 1342 nm lasers.

Key words lasers; dual-wavelength laser pulse; graphene dispersion; Nd:YVO₄ laser; Q-switched

OCIS codes 140.3540; 140.3580; 140.3480

1 引 言

双波长激光脉冲是激光技术的研究热点,在度量学、遥感遥测、非线性光学、生物诊断等方面有重要应用^[1-2]。采用 Cr⁴⁺:YAG 作为可饱和吸收体,可实现 1052 nm 和 1064 nm 双波长激光被动调 Q^[3]。常用的一些可饱和吸收体的能级结构只能对较窄波长范围

内的光产生饱和吸收,例如 Cr⁴⁺:YAG 对 0.9~1.1 μm 范围内的光起到调 Q 作用。另一方面,不同波长的吸收系数和初始透射率的不同产生不一致的调制损耗,会导致不同波长调 Q 脉冲的时间延迟^[4]。这种情况可以通过使用腔外光学触发可饱和吸收体来解决,但这会使谐振腔结构变得复杂。

收稿日期: 2013-09-30; 收到修改稿日期: 2013-11-02

基金项目: 福建省自然科学基金(2012J01277)

作者简介: 梁莉(1989—),女,硕士研究生,主要从事激光技术与器件等方面的研究。E-mail: liangli3627@126.com

导师简介: 王加贤(1955—),男,博士,教授,主要从事激光技术和器件等方面的研究。

E-mail: wangjx@hqu.edu.cn(通信联系人)

石墨烯作为新型的可饱和吸收材料,已经被成功应用在调Q和超快激光器中^[5-6]。例如,将沉积石墨烯纳米复合物的熔锥光纤器件作为饱和吸收体,实现了掺镱光纤激光器(YDFL)的1034.77 nm和1038.85 nm的双波长锁模^[7];通过光学诱导沉积法将石墨烯转移到光纤端面,实现环形腔光纤激光器1564 nm波长的被动调Q,调Q脉冲宽度为3 μs^[8]。Geim和Novoselov^[9]发现,当激发光强足够大时,石墨烯的光生载流子浓度将比本身固有的电子空穴浓度大得多,因此接近狄拉克点的带隙将被新产生的载流子填满。电子是费米子,根据Pauli不相容原理,两个电子不能共处同一能态,因此阻塞了石墨烯更多的吸收,发生漂白^[10]。由于石墨烯的零带隙结构,作为对波长不敏感的可饱和吸收体,具有宽的波长调制范围(0.3~2.8 μm);而且,石墨烯对0.5~2.4 μm附近的波长具有相近的可饱和吸收系数和非线性可饱和吸收特性,使得石墨烯对宽光谱范围内不同波长的调制损耗差别不大。目前,使用石墨烯作为可饱和吸收体实现双波长激光同时调Q的激光器未见报道。本文报道采用石墨烯分散液作为可饱和吸收体,在三镜复合腔Nd:YVO₄激光器中,实现了1064 nm和1342 nm双波长激光器被动调Q。

2 实验装置与石墨烯样品

2.1 实验装置

实验装置如图1所示,激光器采用由两个共线支腔构成的三镜复合腔结构。作为抽运源的激光二极管(LD)带有微通道冷却,在25℃时输出波长为808 nm,经芯径400 μm、数值孔径0.22的光纤耦合输出,再经耦合透镜组准直聚焦后,端面抽运Nd:YVO₄晶体。Nd:YVO₄晶体采用a轴切割,尺寸为5 mm×5 mm×6 mm,Nd³⁺掺杂原子分数为0.5%,通光长度为6 mm。晶体两个面上镀808 nm、1064 nm和1342 nm增透膜,晶体用半导体制冷器(TEC)冷却,晶体左端面与输入镜M₁的距离为1 cm。

输入镜M₁是对808 nm高透、对1064 nm和

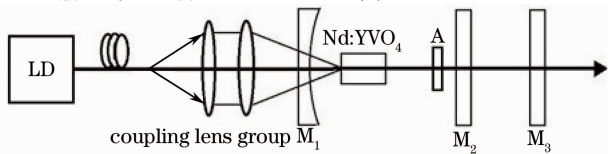


图1 双波长调Q激光器实验装置

Fig. 1 Experimental set-up of a Q-switched dual-wavelength laser

1342 nm高反,曲率半径为50 cm的凹面镜。平面镜M₂对1064 nm高透、对1342 nm透射率T₁为8%,与M₁构成腔长为L₁的1342 nm支腔;平面镜M₃对1342 nm高透、对1064 nm透射率T₂,与M₁构成腔长为L₂的1064 nm支腔。

石墨烯分散液装入3 mm石英比色皿内作为可饱和吸收体,放置在平面镜M₂左侧0.5 cm处(图1中A处)。

实验中采用808 nm长脉冲抽运Nd:YVO₄晶体,脉冲频率为1 kHz,脉冲宽度为500 μs。采用InGaAs光电探测器接收输出激光,经光电转换后输入到300 MHz数字存储示波器上观察脉冲波形;采用光纤光谱分析仪(Ocean Optics SIR-3400 Infrared analyzer)测量激光光谱,光谱仪的波长范围为1000~3400 nm,精度为0.16 nm。

2.2 复合腔的参数选择

Nd:YVO₄晶体激活离子Nd³⁺的⁴F_{3/2}→⁴F_{13/2}和⁴F_{3/2}→⁴F_{11/2}跃迁分别对应的发射波长为1342 nm和1064 nm,这两条谱线共用激光上能级,在双波长运转时必然出现竞争。从20世纪90年代初开始,已有文献对掺钕离子增益介质双波长振荡进行报道,并从理论上给出了双波长振荡条件^[11-12]。2000年Chen^[13]首次报道Nd:YVO₄激光器1342 nm和1064 nm双波长激光连续运转,并比较了二镜腔和三镜复合腔的运转特性,发现三镜复合腔更适合获得双波长激光输出。

在三镜复合腔Nd:YVO₄双波长连续激光器中,要使1342 nm和1064 nm两条谱线同时振荡,必须满足振荡阈值相等条件^[13]。由于1342 nm受激发射截面σ₁小于1064 nm受激发射截面σ₂,所以必须通过调整两个支腔的腔长和输出镜透射率来控制腔内光子数密度,使双波长激光同时起振。对于三镜复合腔双波长调Q激光器,为了使双波长脉冲有较佳的时间重叠,可根据如下关系^[14]

$$L_1/L_2 = \sigma_1 \omega_2^2 / \sigma_2 \omega_1^2, \quad (1)$$

$$\tau_{P1} = \frac{L_i}{c} \left[-\frac{1}{2} \ln(1 - T_i) + \delta_i \right]^{-1}, \quad (2)$$

$$\tau_{P1} = \tau_{P2}, \quad i = 1, 2$$

来确定T₁、T₂、L₁、L₂之间的关系,式中ω₁、ω₂分别是增益介质内1342 nm和1064 nm激光的光束半径,τ_{P1}、τ_{P2}分别是1342 nm和1064 nm激光的光子寿命,σ₁=7.6×10⁻¹⁹ cm²,σ₂=25×10⁻¹⁹ cm²分别是1342 nm和1064 nm激光的受激发射截面。δ₁、δ₂分别是除透射损耗以外,包括石墨烯的线性吸收

在内的腔的单程损耗。对于两个支腔,根据凹面镜曲率半径、腔长和激光波长可以求出 ω_1 和 ω_2 的关系;选取 $L_1=4.5$ cm,由(1)式求出 $L_2=11.3$ cm。在 L_1 和 L_2 确定情况下,选取 T_1 ,由(2)式求出 T_2 。计算时,设 1342 nm 和 1064 nm 支腔的损耗分别为 $\delta_1=0.006$ 、 $\delta_2=0.007$,并取 $L_1=4.5$ cm, $T_1=8\%$,及 $L_2=11.3$ cm,代入(2)式计算得到 $T_2=18.6\%$ 。由于在导出(1)、(2)式时,假设光束在横截面内强度均匀分布,而且腔的损耗没有准确值,所以只能对 T_1 、 T_2 、 L_1 、 L_2 之间的关系进行粗略的估算。

2.3 石墨烯样品

实验中所用的石墨烯分散液(溶剂为 N-甲基-2-吡咯烷酮,简称 NMP)制作过程为:1) 将石墨粉加入氧化剂使其氧化,溶质化;2) 进行微波还原;3) 在溶剂中进行球磨操作,获得层数 $n \leq 10$ 的石墨烯分散液。这种方法的优点在于,在氧化-还原-球磨的制备过程中,石墨烯晶体结构的完整性不会被破坏,依然能够保持其最稳定的二维晶体结构,因此非线性光学性质可以完全归属于材料中主要晶型的特性,而与缺陷或掺杂等因素无关^[15]。

分别采用 1064 nm 和 1342 nm 连续激光测量通过石墨烯分散液的光功率 P_1 ,改变入射光功率 P_0 ,通过公式 $\alpha = \ln(P_0/P_1)$ 计算吸收率 α 与 P_0 的关系,如图 2 所示。可以看出,样品的吸收率均随着入射光功率的增加而减小最后趋于稳定,说明入射的激光功率较小时,吸收较大,随着入射功率的增大,吸收下降。样品具有可饱和吸收特性;而且样品对 1342 nm 比对 1064 nm 激光更容易饱和,即样品对 1342 nm 激光的饱和光强要比对 1064 nm 激光低。

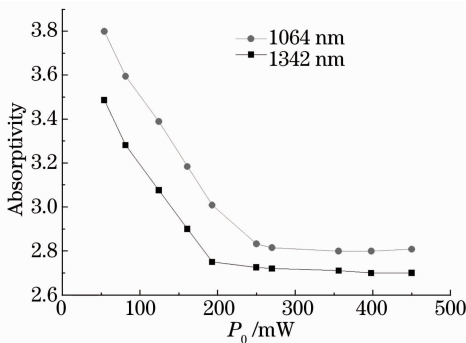


图 2 样品的吸收率与入射激光功率的关系

Fig. 2 Absorbance of sample versus input laser power

3 实验结果与分析

3.1 实验结果

取 M_2 镜的透射率 $T_1=8\%$, $L_1=4.5$ cm, 根据

(1)、(2)式计算得到 $L_2=11.3$ cm, $T_2=18.6\%$ 。实验中采用的 $T_2=20\%$ 导致 1064 nm 光子寿命降低,可通过增大 L_2 得到补偿,但 L_2 增大使腔内光子数密度降低,偏离了双波长振荡阈值相等条件,实验中调整 L_2 以平衡两方面的影响。当 L_2 约为 9.5 cm 时,双波长调 Q 阈值功率为 8.3 W,抽运功率 P 为 12 W,得到脉冲宽度最接近的 1064 nm 激光脉冲和 1342 nm 激光脉冲,如图 3(a) 所示。1064 nm 脉冲宽度为 10.8 ns,输出功率为 0.43 W;1342 nm 脉冲宽度为 12.5 ns,输出功率为 0.51 W,两者峰值时间差为 16 ns,1064 nm 脉冲先于 1342 nm 脉冲。为了进一步研究复合腔参数对激光输出的影响,取 1064 nm 输出镜透射率 $T_2=25\%$,调整 L_2 约为 10.7 cm 时,观察到双波长激光脉冲输出,双波长调 Q 阈值为 8.5 W,抽运功率 P 为 12.5 W,得到脉冲宽度最接近的 1064 nm 激光脉冲和 1342 nm 激光脉冲,如图 3(b) 所示。1064 nm 脉宽为 11.3 ns,输出功率为 0.28 W,1342 nm 脉宽为 14.2 ns,输出功率为 0.36 W,两者脉冲时间差为 19 ns,1342 nm 脉冲先于 1064 nm 脉冲。

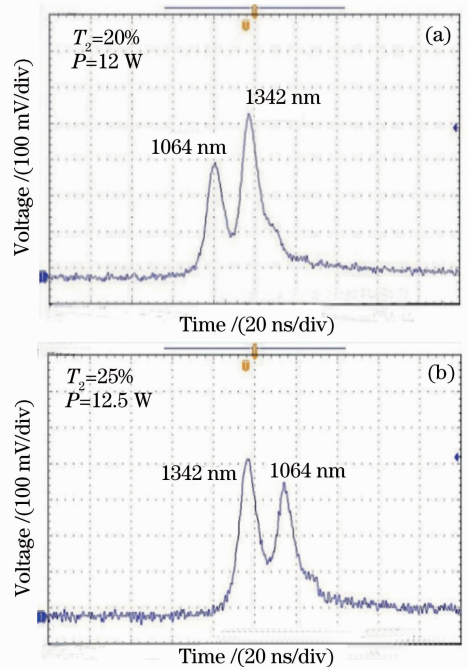


图 3 双波长激光调 Q 脉冲

Fig. 3 Q-switched dual-wavelength laser pulses

3.2 实验结果分析

通过比较,发现一个重要现象:即 $T_2=20\%$ 时,1064 nm 脉冲先于 1342 nm 脉冲振荡;而 $T_2=25\%$ 时,1342 nm 脉冲先于 1064 nm 脉冲振荡。这是由

于当 1064 nm 支腔透射率较小时,1064 nm 损耗低,竞争力强,首先起振,1342 nm 脉冲滞后。当 1064 nm 支腔的透射率 T_2 增大时,1064 nm 激光损耗增大,竞争力变差,滞后 1342 nm 激光起振,所以 1342 nm 激光脉冲在前。实验中输出脉冲并没有完全重叠,与理论分析不相符合的原因是:1) 腔的损耗只是估计,与实际情况有偏差,所以计算得到的两个支腔的参数实际上没有达到最佳匹配,实验中对参数的调整也可能尚未达到支腔的最佳匹配;2) 石墨烯对 1342 nm 和 1064 nm 的饱和光强不同,双波长激光光强没有使石墨烯同时达到对两种波长的吸收饱和。因此,如果在一定范围内逐步调整 1064 nm 输出镜透射率 T_2 的大小、两支腔的腔长匹配以及抽运功率,可以使双波长脉冲有更多的重叠,这对于有些应用,如双波长激光和频是非常有利的。

从以上实验结果还可以看出,石墨烯对 1064 nm 激光调 Q 比对 1342 nm 激光调 Q 得到的脉冲时间宽度要小,其原因除了与激光晶体发射的两种波长的辐射截面有关外,还与石墨烯对这两种波长激光的饱和吸收有很大关系。石墨烯分散液具有宽带的可饱和吸收特性,所以能够对 1064 nm 和 1342 nm 激光同时调 Q,但从图 2 可知,石墨烯分散液对 1342 nm 激光比对 1064 nm 激光更容易达到吸收饱和,即饱和光强更低一些。虽然 1064 nm 的饱和光强大,但由于 1064 nm 支腔取不同透射率时,线性损耗不同,腔内 1064 nm 激光功率密度不同,所以 1064 nm 可能先于或迟于 1342 nm 起振。1064 nm 受激辐射截面大,一旦 Q 开关打开后,建立激光振荡就比较迅速,所以脉冲宽度较窄。

4 结 论

采用石墨烯分散液作为可饱和吸收体,在三镜复合腔的 Nd:YVO₄ 激光器中实现 1064 nm 和 1342 nm 双波长激光被动调 Q。当 1064 nm 输出镜透射率为 20% 时,同时获得脉宽 10.8 ns 的 1064 nm 脉冲和脉宽 12.5 ns 的 1342 nm 脉冲,1064 nm 脉冲在前,两脉冲峰值的时间间隔为 16 ns。当 1064 nm 输出镜透射率为 25% 时,同时获得脉宽 11.3 ns 的 1064 nm 脉冲和脉宽 14.2 ns 的 1342 nm 脉冲,1342 nm 脉冲在前,两脉冲峰值的时间间隔为 19 ns。实验表明石墨烯作为可饱和吸收材料具有宽谱带的调 Q 性能。同时考虑 1064 nm 和 1342 nm 光受激辐射截面的不同以及石墨烯对两种波长吸收

饱和光强的差别,在这基础上进一步优化腔结构和参数,有望获得时间重叠性更好的双波长激光脉冲。

参 考 文 献

- 1 Y E Hou, Y X Fan, J L He, *et al.*. High-efficiency continuous-wave and Q-switched diode-end-pumped multi-wavelength Nd:YAG lasers[J]. *Opt Commun*, 2006, 265(1): 301-305.
- 2 J L He, J Du, J Sun, *et al.*. High efficiency single and dual-wavelength Nd:GdVO₄ lasers pumped by a fiber-coupled diode [J]. *Appl Phys B*, 2004, 79(3): 301-304.
- 3 Lan Ruijun. Research of LD-Pumped Nd:YAG Transparent Ceramic All-Solid-State Lasers [D]. Shandong: Shandong University, 2010. 4-22.
兰瑞君. LD 抽运 Nd:YAG 透明陶瓷全固态激光器研究[D]. 山东: 山东大学, 2010. 4-22.
- 4 W J Cao, H Y Wang, A P Luo, *et al.*. Graphene-based, 50 nm wide-band tunable passively Q-switched fiber laser [J]. *Laser Phys Lett*, 2012, 9(1): 54-58.
- 5 Z Sun, T Hasan, F Torrisi, *et al.*. Graphene mode-locked ultrafast laser [J]. *ACS Nano*, 2010, 4(2): 803-810.
- 6 E Ugolotti, A Schmidt, V Petrov, *et al.*. Graphene mode-locked femtosecond Yb:KLuW laser [J]. *Appl Phys Lett*, 2012, 101(16): 161112.
- 7 Zhang Cheng, Luo Zhengqian, Wang Jinzhang, *et al.*. Dual-wavelength mode-locked Yb-doped fiber laser based on the interaction of graphene and fiber-taper evanescent field [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(6): 0602006.
张成, 罗正钱, 王金章, 等. 熔锥光纤倏逝场作用石墨烯双波长锁模掺镱光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, 39(6): 0602006.
- 8 Wang Xiaolong, Sang Mei, Zhu Pan, *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.
- 9 Geim A K, Novoselov K S. The rise of graphene [J]. *Nature Materials*, 2007, 6(3): 183-191.
- 10 Xu Yanfei, Liu Zhibo, Zhang Xiaoliang, *et al.*. A graphene hybrid material covalently functionalized with porphyrin: synthesis and optical limiting property [J]. *Advanced Materials*, 2009, 21(12): 1275-1279.
- 11 Henderson G A. A computational model of a dual-wavelength solid-state laser [J]. *Appl Phys*, 1990, 68(11): 5451-5455.
- 12 Lin Wenxiong, Shen Hongyuan. A new configuration of the laser cavity for simultaneous dual wavelength Q-switch pulsed Nd:YAlO₃ laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 1999, 48(4): 667-672.
林文雄, 沈鸿元. 一种新型结构的 Nd:YAlO₃ 双波长调 Q 脉冲激光器[J]. *物理学报*, 1999, 48(4): 667-672.
- 13 Y F Chen. CW dual-wavelength operation of a diode-end-pumped Nd:YVO₄ laser [J]. *Appl Phys B*, 2000, 70(4): 475-478.
- 14 Wang Jiaxian, Zhang Juncheng, Su Peilin. Investigation on a compound resonator Nd:YVO₄ laser with dual-wavelength output and intracavity sum-frequency mixing [J]. *High power laser and partial beams*, 2008, 20(12): 1954-1958.
王加贤, 张峻诚, 苏培林. Nd:YVO₄ 复合腔激光器双波长激光输出及腔内和频研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(12): 1954-1958.
- 15 Zhou Kaige. Rational Design and Characterization of Organic Unimolecular Devices and Novel Two-Dimensional Nanomaterials [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.
周凯歌. 新型有机分子器件与二维纳米材料的设计、合成和表征 [D]. 兰州: 兰州大学, 2012.

栏目编辑:殷建芳