

# 全固态石墨烯锁模激光器的脉冲特性分析

王劭予 王丽 包传辰

(北京工业大学应用数理学院, 北京 100124)

**摘要** 为研究腔参数和石墨烯的可饱和吸收特性对脉冲特性的影响,数值求解了描述激光器动力学的 Haus 主方程。采用饱和吸收体的快饱和模型,分析了谐振腔腔长、石墨烯层数、输出镜透射率和激光晶体上光斑半径的变化对脉冲特性的影响,并与半导体可饱和吸收镜(SESAM)做了比较。结果表明,石墨烯和 SESAM 各具优势,例如在腔长短且可饱和吸收体上光斑半径小时选择石墨烯,在腔长长且光斑半径大时选择 SESAM,分别能获得峰值功率更高的脉冲激光。故应根据具体的实验情况选择适当的可饱和吸收体和腔参数。

**关键词** 激光器; Haus 主方程; 脉冲宽度; 峰值功率

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0702012

## Pulse Characteristics Analysis of All-Solid-State Mode-Locked Laser with Graphene

Wang Jieyu Wang Li Bao Chuanchen

(College of Applied Science, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract** The Haus master equation which describes the laser dynamics is solved numerically so as to study the effects of cavity parameters and characteristics of graphene saturable absorber on the pulses characteristics. Adopting the fast saturable absorber model, the relations between pulse characteristics with cavity length, graphene layers, transmittances of output mirror and beam radius on the laser medium are analyzed. In addition, the results are compared with that of semiconductor saturable absorption mirror (SESAM). The conclusions show that the graphene and SESAM have different advantages. For example, for higher pulse energy, graphene is favorable for shorter cavity length and smaller radius on saturable absorber, while the SESAM is better for the opposite situation. The saturable absorbers and cavity parameters should be chosen properly according to concrete situations.

**Key words** lasers; Haus master equation; pulse duration; peak power

**OCIS codes** 320.0320; 320.5550; 320.7090

### 1 引言

超快激光因具有脉冲窄、光谱宽和功率超强等特点广泛应用于基础科学研究、医药科学、材料微加工和光通讯等领域<sup>[1-2]</sup>。被动锁模可以产生更短的光脉冲,目前常用的被动锁模激光器是利用可饱和吸收体作锁模器件。可饱和吸收体的工作原理是利用材料或器件在不同的注入能量下产生不同的损耗的非线性吸收特性来产生皮秒( $10^{-12}$  s)或飞秒

( $10^{-15}$  s)量级的超短脉冲激光。所以锁模脉冲特性与可饱和吸收体特性密切相关。目前使用最广泛的锁模器件是半导体可饱和吸收镜(SESAM)<sup>[3-5]</sup>,但是 SESAM 的制作过程复杂且成本较高,而且常用的 SESAM 材料吸收带宽较窄,通常只有几十纳米。石墨烯因为具有优于传统半导体材料的光学可饱和吸收特性,作为一种新型可饱和吸收体得到了研究人员的广泛关注<sup>[6-8]</sup>。石墨烯的导带和价带接

**收稿日期**: 2013-01-23; **收到修改稿日期**: 2013-03-07

**基金项目**: 北京市教育委员会项目(Km200910005019)和北京市教委科研计划重点项目(Kz201110005010)

**作者简介**: 王劭予(1985-),男,博士研究生,主要从事超短激光脉冲与激光可调谐技术等方面的研究。E-mail: wangjy@emails.bjut.edu.cn

**导师简介**: 王丽(1958-),女,博士,教授,主要从事新型激光器件与光学频率变换技术、光纤传感技术与光纤通信中的非线性效应和脉冲激光沉积制备透明氧化物半导体薄膜材料的物性研究等方面的研究。E-mail: Lwang.1@bjut.edu.cn(通信联系人)

触于狄拉克点,这种零带隙结构可以对所有波段的光无选择性吸收,并且石墨烯的恢复时间很短(小于1 ps)<sup>[9]</sup>,有利于产生超短锁模脉冲,并且石墨烯制备方法简单,成本低。

脉冲宽度和峰值功率是激光锁模脉冲的两个重要属性。在一定的抽运功率下,影响脉冲宽度的主要因素是腔内的净色散量<sup>[10]</sup>,已有文献围绕色散和非线性效应对脉冲的形成和特性影响进行研究<sup>[11]</sup>,然而这些研究结果并不能直接地指导实验。通常实验中的可调因素是抽运功率、谐振腔腔长和输出镜透射率等,这些因素对锁模脉冲影响的理论研究尚未见报道。石墨烯的可饱和吸收特性随着石墨烯层数的增加而改变,这些改变也会影响锁模脉冲的特性。本文利用描述激光器动力学的 Haus 主方程,对全固态石墨烯锁模激光器的脉冲特性进行了理论研究,并将石墨烯与 SESAM 对脉冲的影响做了比较。

## 2 理论模型

全固态石墨烯锁模激光器的结构示意图如图 1 所示。抽运源为激光二极管(LD),发出的连续抽运光通过透镜组聚焦至增益介质(Yb:YAG 晶体)。反射镜和石墨烯饱和吸收体构成谐振腔。输出镜和石墨烯饱和吸收体构成谐振腔。

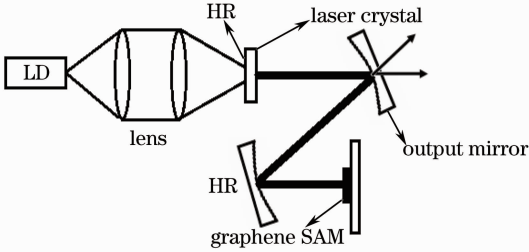


图 1 石墨烯锁模全固态激光器示意图

Fig.1 Schematics of the all-solid-state mode-locked laser with graphene

固态激光器中脉冲形成的过程可由 Haus 主方程<sup>[12-13]</sup>来描述:

$$T_R \frac{\partial}{\partial T} A(T, t) = [-iD \frac{\partial^2}{\partial t^2} + i\delta |A(T, t)|^2] A + [g - l + D_{g,f} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - q(T, t)] A(T, t), \quad (1)$$

式中,  $T$  为实验室坐标系下的时间;  $t$  为脉冲自身坐标系下的时间;  $A(T, t)$  为电场包络的慢变化振幅;  $T_R$  为光在腔内的往返时间;  $D$  为腔内的群时延色散;  $\delta$  为自相位调制(SPM)因子;  $g$  代表饱和增益;  $l$  为一个往返周期的损耗;  $D_{g,f} = g/\Omega_g^2 + 1/\Omega_f^2$  为增

益和腔内滤波色散,其中  $\Omega_g$  为半峰半宽(HWHM)的增益带宽,  $\Omega_f$  为滤波器的 HWHM 带宽;  $q(T, t)$  为饱和吸收因子,是由于超短脉冲而引起的饱和吸收体的响应。

SPM 因子定义为  $\delta = (2\pi n_2 / \lambda_0 A_{\text{eff}}) l_c$ , 其中,  $n_2$  为非线性折射率系数,  $\lambda_0$  为脉冲的中心波长,  $A_{\text{eff}}$  为激光模式的有效面积,  $l_c$  为晶体的长度。在脉冲稳定的情况下,饱和增益定义为

$$g(T) = \frac{g_0}{1 + E_p(T)/(P_L T_R)}, \quad (2)$$

式中  $g_0$  为小信号增益,  $E_p(T) = \int_{-\infty}^{\infty} |A(T, t)|^2 dt$  代表脉冲的能量,  $P_L$  为增益介质的饱和功率。当吸收体的恢复时间与脉冲宽度可比或者大于脉冲宽度时,对应吸收体的慢饱和模型,吸收因子的速率方程可表示为

$$\frac{\partial q(T, t)}{\partial t} = \frac{q(T, t) - q_0}{\tau_A} - \frac{|A(T, t)|^2}{E_A} q(T, t), \quad (3)$$

式中  $q_0$  为吸收体的饱和损耗,  $\tau_A$  为恢复时间,  $E_A$  为吸收体饱和能量。而对吸收体的快饱和模型,即脉冲宽度大于吸收体的恢复时间,此时饱和吸收因子与每个往返周期中脉冲的即时功率有关:

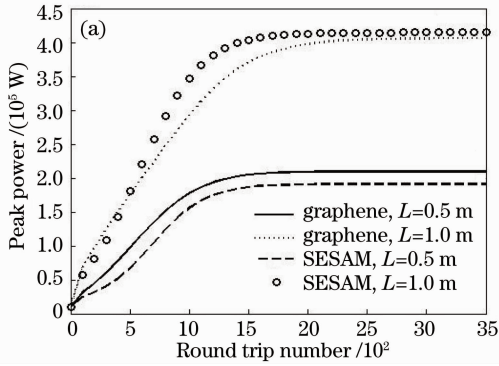
$$q(T, t) = \frac{q_0}{1 + |A(T, t)|^2 / P_A}, \quad (4)$$

式中  $P_A$  为吸收体饱和功率。(4)式为吸收因子的速率方程,结合(1)式可讨论脉冲在固体激光器中的演化问题。

## 3 数值计算与分析

采用分步傅里叶变换方法求解(1)式,假设初始脉冲功率远大于饱和功率,以全固态 Yb:YAG 激光器为例,所用参数为腔长  $L=1$  m, Yb:YAG 晶体长度  $l=1$  mm,输出镜透射率  $T=1\%$ ,激光晶体上光斑半径  $\omega_0=200$   $\mu\text{m}$ ,HWHM 增益带宽  $\Omega_g=1.5677$  THz,小信号增益系数  $g_0=0.22$ ,输出激光波长  $\lambda_0=1030$  nm,非线性折射率  $n_2=6.5 \times 10^{-20}$   $\text{m}^2/\text{W}$ ,可饱和吸收体上光斑半径  $\omega_A=150$   $\mu\text{m}$ 。为便于比较,假设两种可饱和吸收体的调制深度相同,即选取石墨烯层数为两层,对应的调制深度  $\Delta T=1.06\%$ ,饱和通量  $F_{\text{sat}}=14.6785$   $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ ,弛豫时间  $\tau_A=0.5$  ps; SESAM 调制深度  $\Delta T=1\%$ ,饱和通量  $F_{\text{sat}}=50$   $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ ,弛豫时间  $\tau_A=0.7$  ps。假设腔内无色散元件,则群延迟色散  $D=0$ 。

脉冲特性与谐振腔腔长  $L$  的关系如图 2 所示。以石墨烯作为可饱和吸收体时,随着腔长的增长,锁模稳定时脉冲的峰值功率会增大,脉冲宽度也会略微增大。由计算可知,单脉冲的能量随着腔长的增长而增大,因此,在利用石墨烯作为可饱和吸收体的全固态激光器锁模实验中,如果追求高功率,即可以选择较长的腔长;而如果需要窄脉冲宽度,则可设置较短的腔长。同时,腔长的增长会使达到稳定锁模的次数增加,即较短的腔长会更快地达到稳定锁模。



与 SESAM 相比,随着腔长的增长,石墨烯对应的脉冲峰值功率的变化较小,脉冲宽度变化更大。说明腔长的增长对利用 SESAM 产生的锁模脉冲能量的增大比石墨烯要更明显,所以,在不损伤可饱和吸收体的前提下,腔长较短时可以选择石墨烯获得较高能量且脉冲宽度较短的锁模脉冲;而在腔长较长时,可以选择 SESAM 获得能量更高,且脉冲宽度更窄的锁模脉冲。

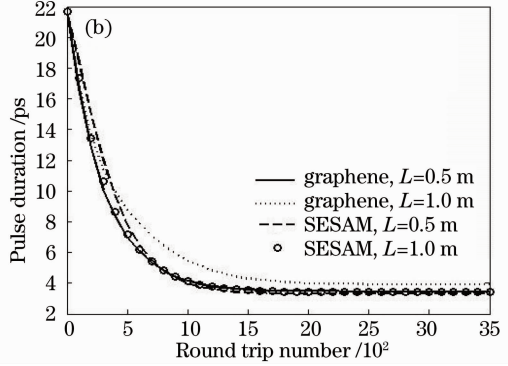


图 2 脉冲特性与腔长关系曲线。(a) 峰值功率;(b) 脉冲宽度

Fig. 2 Relation between pulse characteristics and cavity length number. (a) Peak power; (b) pulse duration

不同层数  $N_G$  的石墨烯对脉冲特性的影响如图 3 所示。选取石墨烯层数  $N_G$  分别为 2 层,4 层和 6 层,对应的调制深度分别为 1.06%,2.04% 和 2.95%。当石墨烯层数为 4 层时,脉冲峰值功率会达到最大值,而随着层数的增加,脉冲宽度会逐渐变窄,达到稳定锁模的时间也逐渐变短,对应的单脉冲能量最大。所以在实验中,可以选择 4 层左右的石墨烯作为可饱和吸收体。选择更高层数的石墨烯做可饱和吸收体虽然可以得到脉冲宽度更窄的锁模脉冲,但是这样也会增大稳定锁模所需的临界抽运功率。

影响。随着输出镜透射率的增大,峰值功率明显降低,同时脉冲宽度也有明显增大,这是因为透射率的增大提高了腔内损耗  $\delta$ ,在抽运功率一定的条件下,使得腔内功率降低,从而降低了稳定锁模时脉冲的能量。所以在抽运功率较小且不能增大的条件下,选择透射率小的输出镜可以获得峰值功率更高,脉冲宽度更窄的锁模脉冲,与 SESAM 相比,相同透射率时,石墨烯对应的锁模脉冲的峰值功率和脉冲宽度都优于 SESAM。

激光晶体上光斑半径  $\omega_0$  的变化对脉冲特性的影响如图 5 所示。由图 5 可知,光斑半径的增大使得脉冲峰值功率明显增大,同时脉冲宽度也有一定

图 4 给出了不同输出镜透射率  $\delta$  对脉冲特性的

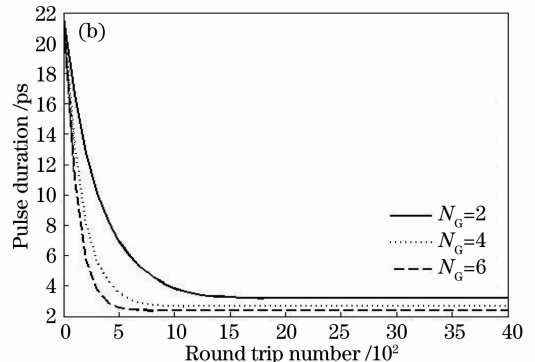
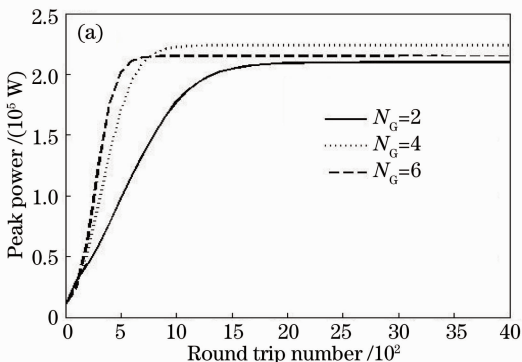


图 3 脉冲特性与石墨烯层数关系。(a) 峰值功率;(b) 脉冲宽度

Fig. 3 Relationship between pulse characteristics and graphene layers. (a) Peak power; (b) pulse duration

量的增大,而且稳定锁模所需时间也增长,较大的光斑半径对应的单脉冲能量会更高,这是因为激光增益粒子数增多,从而提高了腔内功率。但是在实验中,必须考虑模式匹配问题,否则半径过大反而会减

小输出功率。与腔长变化的影响类似,SESAM 对激光晶体上光斑半径变化的响应更为明显,即脉冲峰值功率的变化更大,而脉冲宽度变化更小,从而 SESAM 对应的单脉冲能量增大比石墨烯的更大。

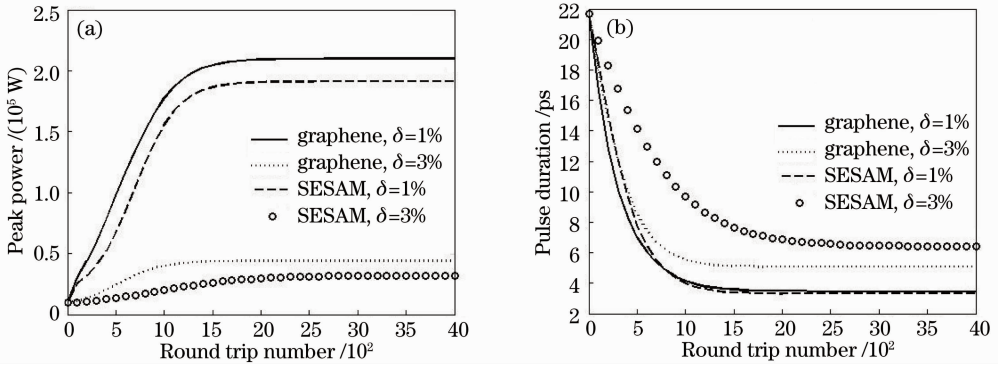


图 4 脉冲特性与输出镜透射率关系。(a) 峰值功率; (b) 脉冲宽度

Fig. 4 Relationship between pulse characteristics and transmittance of output mirror. (a) Peak power; (b) pulse duration

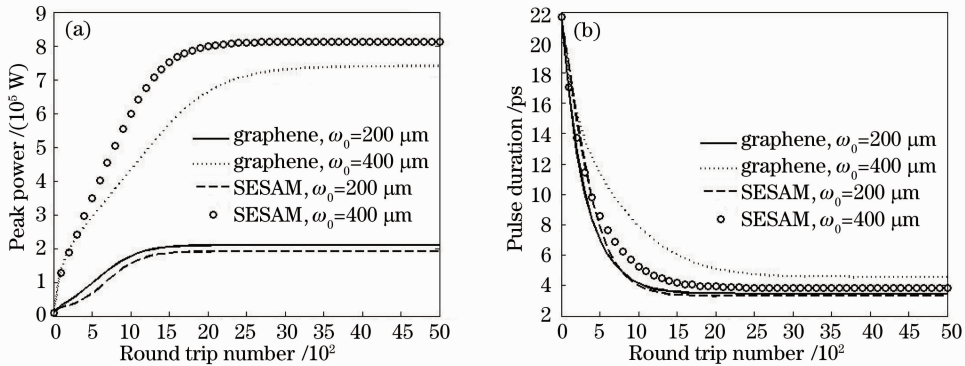


图 5 脉冲特性与激光晶体上光斑半径关系。(a) 峰值功率; (b) 脉冲宽度

Fig. 5 Relationship between pulse characteristics and beam radius on laser medium. (a) Peak power; (b) pulse duration

## 4 结 论

腔参数和可饱和吸收体参数是全固态锁模激光器设计过程中需主要考虑的可调参数,有必要从理论上了解它们对脉冲参数的影响。从 Haus 主方程出发,对利用石墨烯作为可饱和吸收体时,谐振腔腔长、石墨烯层数、输出镜透射率和激光晶体上光斑半径的变化对脉冲特性的影响进行了数值分析,并与 SESAM 做了比较。结果表明,石墨烯和 SESAM 作为可饱和吸收体各有优势,例如腔长短时选择石墨烯,腔长长时选择 SESAM 作可饱和吸收体;抽运功率比阈值功率足够大的条件下,可饱和吸收体上光斑半径小时选择石墨烯,光斑半径大时选择 SESAM,可以获得峰值功率更高的脉冲光。因此根据具体的实验情况选择可饱和吸收体,设置适当的腔参数,可以获得符合要求的锁模脉冲光。

## 参 考 文 献

- U Keller. Recent developments in compact ultrafast lasers[J]. Nature, 2003, 424(6950): 831–838.
- K Schutze, H Posl, G Lahr. Laser micromanipulation systems as universal tools in cellular and molecular biology and in medicine [J]. Cell Mol Biol, 1998, 44(5): 735–746.
- C Honninger, G Zhang, U Keller, *et al.*. Femtosecond Yb: YAG laser using semiconductor saturable absorbers [J]. Opt Lett, 1995, 20(23): 2402–2405.
- 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.
- A Garcia-Cortes, J M Cano-Torres, M D Serrano, *et al.*. Spectroscopy and lasing of Yb-doped NaY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>: tunable and femtosecond mode-locked laser operation[J]. IEEE J Quantum Electron, 2007, 43(9): 758–764.
- Z P Sun, T Hasan, T Felice, *et al.*. Graphene mode-locked ultrafast laser[J]. ACS Nano, 2010, 4(2): 803–810.
- He Jingliang, Hao Xiaopeng, Xu Jinlong, *et al.*. Ultrafast mode-locked solid-state lasers with graphene saturable absorber [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900138.

- 何京良,郝霄鹏,徐金龙,等. 基于石墨烯可饱和吸收被动锁模超快全固体激光器的研究[J]. 光学学报,2011, 31(9): 0900138.
- 8 Wang Yonggang, Qu Zunshi, Liu Jie, *et al.*. High power picosecond laser mode locked with carbon based absorbers[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0702001.
- 王勇刚,曲遵世,刘杰,等. 碳基吸收体被动锁模大功率皮秒激光器[J]. 中国激光,2012, 39(7): 0702001.
- 9 M Breusing, C Ropers, T Elsaesser. Ultrafast carrier dynamics in graphite[J]. Phys Rev Lett, 2009, 102(8): 086809.
- 10 W Lu, L Yan, C R Menyuk. Dispersion effects in an actively mode-locked inhomogeneously broadened laser [J]. IEEE J Quantum Electron, 2002, 38(10): 1317–1324.
- 11 Cao Yile, Yu Li, Yang Bojun. Effects of dispersion and self-phase modulation on pulses in solid-state laser [J]. Laser Technology, 2005, 29(3): 248–250.
- 曹轶乐,于丽,杨伯君. 固体激光器中色散与自相位调制对脉冲的影响[J]. 激光技术,2005, 29(3): 248–250.
- 12 H A Haus. Theory of mode-locking with a fast saturable absorber[J]. J Appl Phys, 1975, 46(7): 3049–3058.
- 13 F X Kartner, I D Jung, U Keller. Soliton mode-locking with saturable absorber[J]. IEEE J Select Topics Quantum Electron, 1996, 2(3): 540–556.

栏目编辑：张腾