

基于二维材料的超短脉冲特性研究

袁文倩 田小青 李晓辉

(陕西师范大学 物理学与信息技术学院, 陕西 西安 710062)

摘要 基于以二维材料为可饱和吸收体的超短脉冲激光器,研究了脉冲在光纤激光器中的传输特性,使用傅里叶算法利用计算机,模拟了光脉冲在激光器中传播的过程.研究发现在非线性系数由 $0.3 \times 10^{-3} \text{ w}^{-1} \text{ m}^{-1}$ 变化到 $6 \times 10^{-3} \text{ w}^{-1} \text{ m}^{-1}$ 的过程中,输出脉冲持续时间在皮秒量级且呈线性增加,脉冲的中心波长为 1550 nm,单个脉冲稳定时能量在 $1.05 \times 10^4 \text{ pJ}$ 左右,为后面的超短脉冲研究提供可依靠的数据支持.

关键词 超短脉冲;二维材料;非线性系数;脉冲持续时间

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

0 引言

脉冲激光因为其具有脉冲宽度窄、适用光谱范围宽、脉冲能量高等优点,使脉冲激光在很多行业和领域起着重要的作用.例如,脉冲激光被应用于微电子学领域中进行激光修整、激光光刻、激光微机械加工等;在微机械学中又可以进行刻度、打标等工作;在微电子学领域中也还是芯片集成制造的助力;在光子器件和全光通讯领域可以利用脉冲激光制作光学波导等.因为脉冲激光具有较高的准确度,因此在精细医疗器件制作以及细胞生物工程技术领域也有很大的作用.

自 2004 年 Geim 等人用胶带从一整块石墨上剥离得到一个原子层厚度的石墨烯^[1]后,少层二维材料进入了科学家们的视野,这种材料因为其独特的电子、物理、化学性能吸引了很多学者对其进行研究^[2-4].

石墨烯是由单层碳原子紧密堆积而构成的,呈现二维蜂窝状的结构分布^[5],有着优异的机械性能、超宽带的光学响应谱.除此之外,还有超高的热导率和载流子迁移率、短的弛豫时间、高的非线性系数等优点,因而被认为是理想的可饱和吸收体材料^[6-8],在 2010 年前后得到了广泛的研究. Jiang X 等人在 2018 年发表了基于 MXene $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 可饱和吸收体实现了稳定的飞秒光纤激光器^[6]. 同一年,山东大学的 Li Z 等人以石墨烯/ WS_2 异构体为可饱和吸收体实现了被动调 Q 激光器的操作,激光器输出功率为 275 mW,这种异构体 SA(可饱和吸收体)与单一的 WS_2 或者石墨烯 SA 器件相比,其脉冲具有更高的能量^[7]. Wang B. B 等人于 2018 年发表于聊城大学学报的研究中采用液相分离的方法制备了黑磷并实现了被动锁模激光器,在 1064.13 nm 处实现了连续的稳定脉冲输出、脉冲重复频率为 91.5 MHz、脉冲宽度 5.7 ps、泵浦功率为 2.5 W 的条件下得到 300 mW 的最大输出功率^[8]. Wang T 等人利用氧化石墨烯在泵浦功率为 10.90 W 时,输出功率达到 2.11 W,脉冲宽度 115 ns,这是一个很高的输出功率的结果^[9]. 由以上研究的结果可以看出,以氧化石墨烯为 SA 时可以得到较高的输出功率.除了石墨烯相关材料外,近年来基于 MXene 的激光器也有很多进展. 2017 年 Dong Y 等人发表了基于 MXene $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 的飞秒光纤激光器^[10]. 在 2018 年,山东大学的 Wang C 等人以

收稿日期: 2020-05-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(61605106);陕西师范大学启动基金项目(1112010209,1110010717);中央高校基础研究基金项目(GK201802006);陕西省国际合作项目计划项目(2020KW-005);中国科学院瞬态光学与光子学国家重点实验室开放性研究基金项目(SKLST201809);陕西师范大学优秀青年学术骨干资助项目(18QNGG006)资助

通讯作者: 李晓辉,男,汉族,博士,教授,研究方向:超快光纤激光器及应用, E-mail: lixiaohui@snnu.edu.cn.

相同的材料获得了相同的稳定激光输出,脉冲宽度为 454 ns,单个脉冲能量为 0.2 脉冲,峰值功率为 406 mW^[11]. 西安邮电大学的孙宇航等人发表于聊城大学学报 2019 年 02 期的研究中将二维材料 GO-COOH 与聚合物聚乙烯醇(PVA)混合制成饱和吸收体薄膜,在掺铒光纤激光器中实现了稳定的调 Q 运转. 泵浦功率为 11-45 mW 时,激光器可以在 12.05-22.52 kHz 重复频率范围内进行调谐,调 Q 脉冲的脉冲宽度的可调谐范围为 19.81-4.66 μ s^[12].

Li X. H 等人于 2012 年发表了关于被动锁模激光器中孤子演化的数值研究,当适当改变泵浦的强度或者相位延迟可以控制孤子的峰峰分离,给出了孤子演化和泵浦强度以及相位延迟之间的关系,发现了孤子稳定周期演化的机制^[13]. Tong Chai 等人对锁模掺铒光纤激光器中抛物线脉冲的演化进行了数值模拟,当偏振角从 0.365 到 0.4 π 且群速度色散在 0.006 到 0.03 ps² 变化时,在光纤谐振器中可以得到稳定的抛物型脉冲输出. 当色散为 0.014 ps² 时,得到脉冲宽度为 7.35 ps、脉冲强度为 1.7 nJ 与抛物型脉冲十分吻合,脉冲能量随着色散的增大而增大^[14].

1 理论依据

NLS 方程是非线性微分方程,一般情况下不适合于解析求解,为了明确光纤中的非线性效应,需要进行数值处理. 可采用的数值方法有许多,在这里采用的是分步傅里叶方法.

分步傅里叶方法的主要原理如下,将非线性薛定谔方程改写为

$$\frac{\partial A}{\partial z} = (\hat{D} + \hat{N})A, \quad (1)$$

式中 \hat{D} 是差分算符,表示的是线性介质的色散和吸收, \hat{N} 是非线性算符,代表着光脉冲在光纤传输过程中的非线性效应,这些算符为

$$\hat{D} = -\frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2}{\partial T^2} + \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3}{\partial T^3} - \frac{\alpha}{2}, \quad (2)$$

$$\hat{N} = i\gamma[|A|^2 + \frac{i}{\omega_0} \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial T} (|A|^2 A) - T_R \frac{\partial |A|^2}{\partial T}]. \quad (3)$$

现实情况下光脉冲在光纤中传播的过程中,色散和非线性效应是同时进行的. 分步傅里叶算法假定在光传输过程中的一小段距离 h 中,色散效应和非线性效应可以分别进行作用,从而得到近似结果. 也就是说在光由 z 传输到 $z+h$ 这一过程中分两步进行,第一步只考虑非线性作用而第二步只考虑色散作用,方程(1)中括号里的两项在第一步和第二步分别为 0. 改善分步傅里叶算法的精度后得到一个分步傅里叶算法的数学表达

$$A(z+h, T) \approx \exp(\frac{h}{2}\hat{D}) \exp\left[\int_z^{z+h} \hat{N}(z') dz'\right] \exp(\frac{H}{2}\hat{D})A(z, T). \quad (4)$$

分步傅里叶算法是一种执行相对便捷的算法. 光纤在传输长度方向上被分为很多小区间,这些小区间不一定等距离. 光按照(4)方程的形式从一个小区间传输到下一个小区间,光场在开始传输的过程中只靠考虑色散,而在传输到小区间中间位置时以此刻的非线性项来代表在整个小区间内的非线性效应,在该小区间剩下的范围内传输时只考虑色散. 也就是说假定非线性效应只集中在每个区间的中间,用集中于区间中间位置的非线性效应来代表整个区间的非线性效应.

二维材料是电子仅可在两个维度上自由运动的材料,横向尺度大、厚度方向则仅有一个或几个原子层厚度. 二维材料的结构大都是平面层状的. 例如,石墨烯是由碳原子构成的六角蜂巢结构^[15],相邻碳原子通过 σ 键连接,键长为 0.142 nm,键角为 120°,可由 van der Waals 力相互作用堆叠形成石墨^[1]. 黑磷呈单层褶皱的蜂巢结构. 砷烯是单层砷原子的椅状蜂巢结构,键长和键角分别为 0.245 nm 和 92.54°,锑烯与砷烯相似,键长和键角分别为 0.276 nm 和 91.31°^[16].

2 实验结果与数据分析

这里所设定的光纤传输环境:光纤长度为 25 km、二阶色散系数为 0.03 ps²/m、初始条件为双曲正割.

为了研究非线性效应对输出脉冲的影响,设置非线性系数由 $0.3 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \text{ m}^{-1}$ 变化到 $6 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \text{ m}^{-1}$,

改变非线性系数进行多次试验以非线性系数为唯一变量纵向对比试验结果有以下发现.

非线性系数的变化影响脉冲的形状;非线性系数变大的过程中脉冲的形状由尖锐逐渐变宽.图 1(a)到(d)给出非线性系数分别为 $0.3 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \text{ m}^{-1}$ 、 $2.3 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \text{ m}^{-1}$ 、 $4.3 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \text{ m}^{-1}$ 、 $6 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \text{ m}^{-1}$ 时的脉冲形状图像.

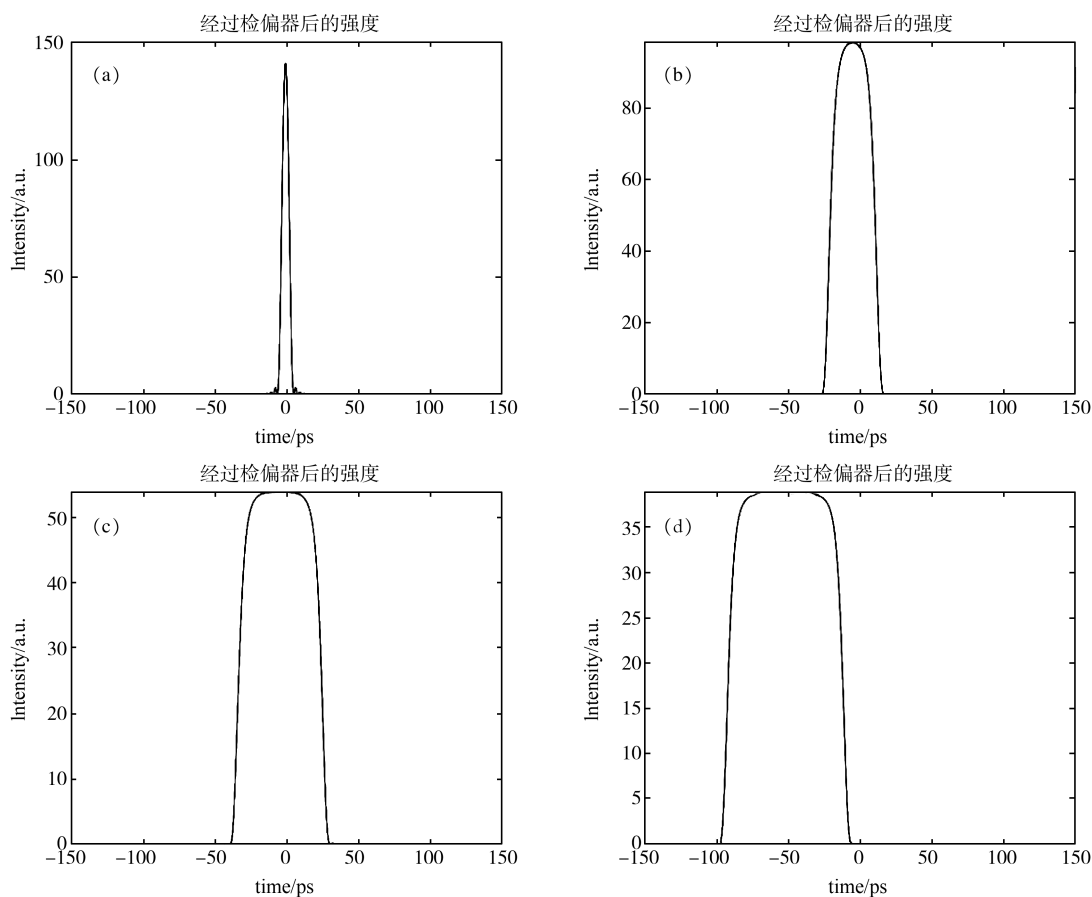


图 1 非线性系数为(a) $0.3 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \text{ m}^{-1}$; (b) $2.3 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \text{ m}^{-1}$; (c) $4.3 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \text{ m}^{-1}$; (d) $6 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \text{ m}^{-1}$ 时的脉冲时域图像

由以上四幅图片明显发现在非线性系数变大的过程中脉冲形状由尖锐变得圆滑、脉冲宽度增长、峰值能量降低.为进一步探究非线性系数的改变对脉冲的峰值功率以及脉冲持续时间的影响,以非线性系数为横坐标、脉冲峰值功率为纵坐标绘制相关曲线对应于图 2.

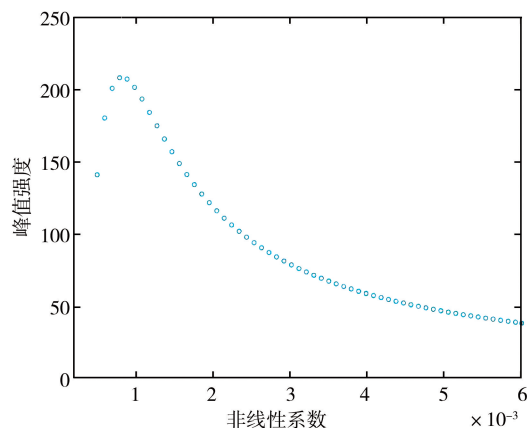


图 2 单个脉冲峰值强度随非线性系数的变化

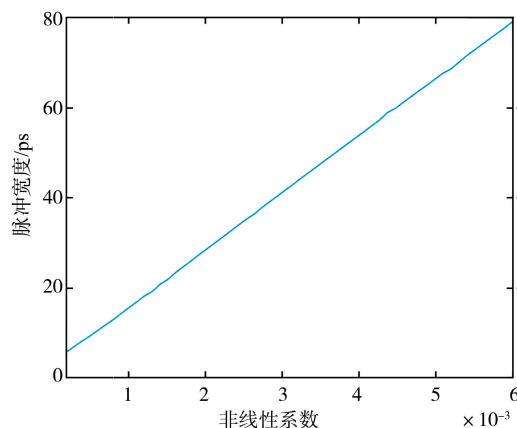


图 3 脉冲宽度随非线性系数的变化

在图 2 中描述了脉冲峰值强度与非线性系数之间的关系.脉冲峰值强度与非线性系数之间呈现曲线关系并且不是单调的,在非线性系数取到 $6 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \text{ m}^{-1}$ 附近出现了拐点,对于这一拐点,目前我认为的原因是影响脉冲形状的因素有很多,脉冲的形状是多个因素共同决定的结果,在这里只改变非线性系数而没有改

变别的参数的情况下脉冲持续时间就很可能发生复杂的变化。

图 3 描述了脉冲宽度随非线性系数的变化,由图可知当非线性系数在 $0.3 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \text{ m}^{-1}$ 到 $6 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \text{ m}^{-1}$ 区间变化时脉冲宽度的变化是线性且逐渐增加的,脉冲宽度的具体数值从 5.6 ps 增加到 79.3 ps 左右.从理论上来看能使脉冲发生展宽的是色散效应,在这里非线性系数的变化引起了脉冲宽度变宽,这两者并不矛盾.从色散效应与非线性效应需要互相匹配的角度来看是容易理解的,非线性系数的变化某种程度上是相互匹配的色散系数的变化,这也进一步反映影响脉冲特性的因素是多方面的。

考虑到色散效应引起的脉冲展宽,在这里我们将描述色散效应对脉冲宽度的影响,与上面的结论进行对比.将非线性系数控制不变,而改变二阶色散系数的值,做类似于上图相似的工作,得到图 4。

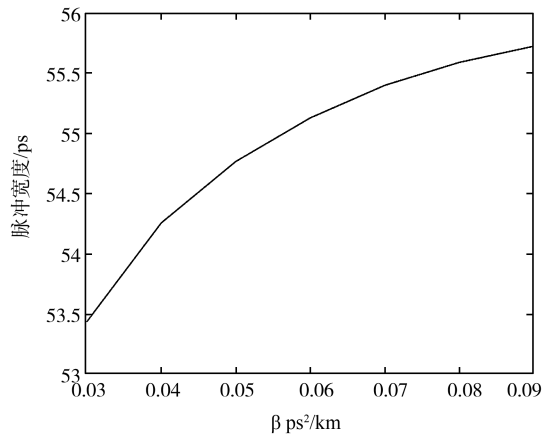


图 4 脉冲宽度随二阶色散系数的变化

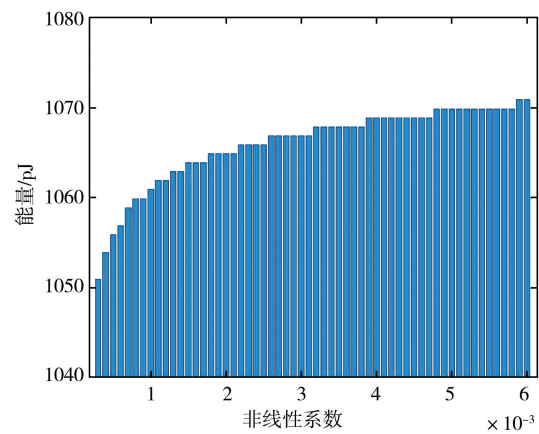


图 5 稳定传输时单个脉冲能量随非线性系数的变化

可以看出在二阶色散增加的过程中,脉冲宽度也在增加,充分体现了色散效应对脉冲的展宽作用。

非线性系数除了对输出脉冲的形状有影响外还影响着稳定输出时单个脉冲的能量大小,结合多次试验结果绘制了关于稳定传输时单个脉冲能量的柱状图如图 5。

在非线性系数逐渐增大的过程中,单个脉冲的能量也不断增加但是增加的趋势越来越缓慢,柱状图中出现平齐的部分是因为纵坐标的精度不够,单个脉冲能量的具体数值从大约 1051 pJ 增加到 1071 pJ。

3 展望

超快激光器自 20 世纪 60 年代发展以来就得到人们的重视和关注,研究者们为追求更窄的脉冲但更高的能量不断探索,对激光器的结构、锁模方式、可饱和吸收物质等等进行创新.超快激光器也得到了长足的发展.将二维材料应用于超快激光器是因为注意到二维材料的非线性光学响应、调制深度等等特性作为 SA 有巨大潜力.各项研究事实也证明二维材料为超快激光器的发展打开了新的大门,二维材料在多波长超快激光器的发展中展现了独特的推进作用,在郭波的文章中介绍了二维材料在多波长超快激光器中的最新应用,说明了二维材料在提高超快激光器的工作波长范围上的贡献^[17].在以后的研究中如果得到能产生脉冲短、重复率高、能量适合的超快脉冲激光器,那这将为人们在研究物质的超快变化提供一把“尺子”,在纳米量级甚至更小量级的材料加工上表现更加优越。

4 结论

针对模拟的结果得到以下结论:脉冲传输过程激光器累积的非线性效应与色散效应不能匹配时,脉冲不能稳定传输,可能发生脉冲的分裂.脉冲传输稳定性受多种因素影响,小信号增益参数的变化将影响脉冲形状.随着非线性系数由 $0.3 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \text{ m}^{-1}$ 到 $6 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \text{ m}^{-1}$ 的过程中,脉冲宽度呈现线性增加趋势,由 5.6 ps 增加到 79.3 ps 左右.单个脉冲脉冲峰值功率呈现先增长后下降的变化,且脉冲峰值功率变大的过程中脉冲能量变小;单个脉冲能量从大约 1051 pJ 增加到 1071 pJ,但变化逐渐缓慢,在一定范围内增加非线性系数可以提高单个输出脉冲能量。

本文对非线性系数在脉冲激光中作用的理论研究得到的结论可以为后面超短脉冲激光器的制造以及优化提供理论依据和方向。

参 考 文 献

- [1] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films [J]. *Science*, 2004, 306(5696): 666-999.
- [2] Jiang M. Preparation of Graphene and Carbon Nanotubes Saturable Absorbers and Their Experimental Study on Passively Adjusted Mode Lasers[D]. Xi'an: Northwest University, 2013.
- [3] Dawlaty J M, Shivaraman S, Chandrashekar M, et al. Measurement of ultrafast carrier dynamics in epitaxial graphene [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(4): 042116.
- [4] Kumar S, Anija M, Kamaraju N, et al. Femtosecond carrier dynamics and saturable absorption in graphene suspensions [J]. *Applied Physics Letters*, 2009 95(19): 191911.
- [5] Xing G, Guo H, Zhang X, et al. The physics of ultrafast saturable absorption in graphene [J]. *Optics Express*, 2010, 18(5): 4564-4573.
- [6] Jiang X, Liu S X, Liang W H, et al. Broadband nonlinear photonics in few-layer MXene $Ti_3C_2T_x$ (T=F, O, or OH) [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(2): 1700229.
- [7] Li Z, Cheng C, Dong N, et al. Q-switching of waveguide lasers based on graphene/WS₂ van der Waals heterostructure [J]. *Photonics Research*, 2017, 5(5): 406-410.
- [8] Wang B B, Gao C C, Wang G J, et al. Passively mode-locked Nd:YVO₄ laser using black phosphorus as a saturable absorber [J]. *Journal of Liaocheng University(Natural Science Edition)*, 2018, 31(1): 45-49.
- [9] Wang T, Wang J, Wang Y, et al. High-power passively Q-switched Nd: GdVO₄ laser with a reflective graphene oxide saturable absorber [J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(2): 020009.
- [10] Dong Y, Chertopalov S, Maleski K, et al. Saturable absorption in 2D Ti_3C_2 MXene thin films for passive photonic diodes [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(10): 1705714.
- [11] Wang C, Peng Q Q, Fan X W, et al. MXene $Ti_3C_2T_x$ saturable absorber for pulsed laser at 1.3 μm [J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(9): 094214.
- [12] 孙宇航, 靳伟, 杜恭贺, 等. 基于羧基氧化石墨烯的调 Q 光纤激光器 [J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2019, 32(2): 53-57.
- [13] Li X H, Wang Y S, Zhao W, et al. Numerical investigation of soliton molecules with separation changeable in passively mode locked fiber lasers [J]. *Opt Commun*, 2012, 285(6): 1356-1361.
- [14] Chai T, Li X H, Guo P L. Investigation of mid-infrared parabolic pulses evolution in a mode-locked Er-doped fiber laser based on nonlinear polarization rotation technique [J]. *JOPT*, 2019, 21: 025501.
- [15] Matthew J A, Vincent C T, Richard B K. Honeycomb carbon: a review of Graphene [J]. *Chem Rev*, 2010, 110(1): 132-145.
- [16] Zhang S, Yan Z, Zeng H, et al. Atomically thin arsenene and antimonene: semimetal-semiconductor and indirect-direct band-gap transitions [J]. *Angew Chem Int Ed Eng*, 2015, 54(10): 3112-3115.
- [17] 郭波. 基于二维材料非线性效应的多波长超快激光器研究进展 [J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(1): 0103002 .

Study on the Characteristics of Ultrashort Pulse based on Two-Dimensional Materials

YUAN Wen-qian TIAN Xiao-qing LI Xiao-hui

(School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract Based on the ultrashort pulse laser with two-dimensional material as saturable absorber, the transmission characteristics of the pulse in the fiber laser are studied. The propagation process of the pulse in the laser is simulated by using the Fourier algorithm and computer. It is found that in the process of changing the nonlinear coefficient from $0.3 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \text{ m}^{-1}$ to $6 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \text{ m}^{-1}$, the duration of output pulse increases linearly at picosecond level, the central wavelength of the pulse is 1550 nm, and the energy is about $1.05 \times 10^4 \text{ pJ}$ when a single pulse is stable. It can provide data support for the research of ultrashort pulse.

Key words ultrashort pulse; two-dimensional material; nonlinear coefficient; pulse duration