

# 强激光系统光束质量的非线性退化及补偿研究

张鲁薇 李晓彤 岑兆丰 阮望超 罗红妹

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 为了在强激光非线性传输仿真中综合考虑系统像差等因素,提出了一种基于光线追迹的非线性介质光追方法,并编程实现了线性介质与非线性介质的混合建模。以三片式聚焦系统为例,在系统中加入 KDP 晶体作为非线性介质,仿真分析了不同激光功率密度下 KDP 晶体的非线性效应对光束质量的影响。仿真结果表明,当激光功率密度达到  $1.62 \times 10^{10}$  W/cm<sup>2</sup> 时,非线性效应会导致光束质量明显下降。在该仿真结果的基础上提出了在不改变焦面位置的情况下,将元件间隔作为补偿器进行系统优化的方法。优化结果表明,焦斑尺寸较优化前减小  $2.8 \mu\text{m}$ ,规范尺寸下的环围能量提高了 16.2%,焦面处的光束质量得到显著改善。

**关键词** 非线性光学;光传输仿真;光线追迹;强激光系统;光束质量;混合建模

**中图分类号** O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0214005

## Research on Nonlinear Degeneration and Compensation of Beam Quality in High Power Laser System

Zhang Luwei Li Xiaotong Cen Zhaofeng Ruan Wangchao Luo Hongmei

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University,  
Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** In order to consider factors such as system aberrations into account in the nonlinear propagation simulation of high power laser, a ray-tracing method for nonlinear media is presented, and hybrid modeling for linear and nonlinear media is realized through programming. Three-lens focusing system with KDP crystal as the nonlinear media is taken as an example, and simulation analysis of the influence of nonlinear effect on beam quality is conducted with different laser power densities. The simulation results show that when the laser power density reaches  $1.62 \times 10^{10}$  W/cm<sup>2</sup>, the laser beam quality is degenerated evidently by nonlinear effect. Based on the simulation results, an optimization method, which takes the optical component intervals as compensation without changing the position of focal plane, is presented. The optimization results show that the focal spot size decreases by  $2.8 \mu\text{m}$ , and the encircled energy under standardized dimension increases by 16.2%, thus the beam quality at focal plane is significantly improved.

**Key words** nonlinear optics; beam propagation simulation; ray tracing; high power laser system; beam quality; hybrid modeling

**OCIS codes** 190.3270; 190.5940; 140.3295; 080.1510

## 1 引 言

对于强激光系统而言,激光光束质量是评价系统性能的重要指标。由系统中非线性介质折射率受到光强调制而导致的非线性效应常常引起光束波前

畸变,从而导致激光光束质量的退化,并影响强激光系统的安全运行<sup>[1-3]</sup>。因而,研究非线性效应对光传输及光束质量的影响,进而提出相应的系统优化方法,对于改善激光束质量、提高强激光系统性能具

**收稿日期**: 2013-07-31; **收到修改稿日期**: 2013-10-20

**基金项目**: 国家自然科学基金(11275166)

**作者简介**: 张鲁薇(1988—),女,硕士研究生,主要从事光学系统设计、非线性光学等方面的研究。

E-mail: xiaoweilucia@gmail.com

**导师简介**: 李晓彤(1962—),女,博士,教授,主要从事光学系统设计与分析、软件开发等方面的研究。

E-mail: lixt@zju.edu.cn(通信联系人)

有十分重要的意义。

强激光非线性传输问题的研究方法主要可以分为波动光学方法和光线光学方法。波动光学方法是对非线性薛定谔方程进行数值求解,可以同时考虑衍射、群速度色散、自聚焦等效应,但是要得到准确的解析解十分困难,常常采用旁轴近似等多种简化处理。Feit 等<sup>[4-5]</sup>提出在求解非线性薛定谔方程的过程中引入非旁轴修正,并考虑矢量效应,但是这些修正项的推导过程中依然采用了多种近似。一般采用分步傅里叶法等方法求解数值解来得到更为精确的理论分析<sup>[6-10]</sup>。

光线光学方法最早由 Censor<sup>[11]</sup> 在 1977 年提出, Kasparian 等<sup>[12]</sup> 提出划分网格,进行小步长光线追迹,通过统计网格内的光强来计算折射率分布的方法。Gao 等<sup>[13]</sup> 利用维格纳分布函数(WDF)和迭代光追的方法进行自聚焦仿真,WDF 用于初始化光线的位置和动量,但非近轴情况下求解 WDF 比较复杂。

考虑到在强激光系统中,系统像差等因素会对光束产生振幅和相位调制,影响光束在非线性介质中的传输,故采用改进的光线追迹方法进行非线性光传输仿真,该方法无须近轴近似,并可以综合考虑系统像差等因素的影响,同时也有利于实现线性介质与非线性介质的混合建模<sup>[14]</sup>。本文以三片式聚焦透镜为例,在其中加入非线性介质 KDP 晶体,对不同光束功率密度下的非线性光传输进行了仿真,同时根据仿真结果,对焦面处的光束质量进行分析,并利用光学系统元件间隔作为补偿器,给出了优化结果。

## 2 混合建模方法

为了能够对含有线性与非线性介质的实际光学系统进行光传输仿真分析,提出了基于光线光学的非线性介质光追模型,并通过编程实现了线性与非线性介质的混合建模。

### 2.1 非线性介质建模方法

对非线性介质的光线追迹建模采用对非线性介质进行垂直切片的方法,如图 1 所示。当切片间隔很小时,可以认为切片之间为线性传输,即可采用显式亚当斯法求解光线方程进行光线追迹,光线方程可表示为

$$\frac{d}{ds} \left( n \frac{dr}{ds} \right) = \nabla n, \quad (1)$$

式中  $r$  为光线上任意一点的矢径,  $n$  为折射率,  $s$  为

光程。在每一切片端面处考虑介质的非线性效应,则光强对折射率  $n$  的调制公式可表示为

$$n = n_0 + \gamma I, \quad (2)$$

式中  $n_0$  为线性折射率,  $\gamma$  为非线性折射率系数,  $I$  为光强,且  $\gamma$  可表示为

$$\gamma = \frac{12\pi^2}{cn_0^2} \chi^{(3)}, \quad (3)$$

式中  $c$  为光速,  $\chi^{(3)}$  为三阶极化率张量(二阶极化不直接作用于非线性折射率,可以忽略),利用(2)、(3)式可以进行折射率分布的计算,之后采用亚当斯法继续进行线性追迹<sup>[15-17]</sup>。本文研究的强激光为准连续光,且不考虑激光与非线性介质作用的时间效应。

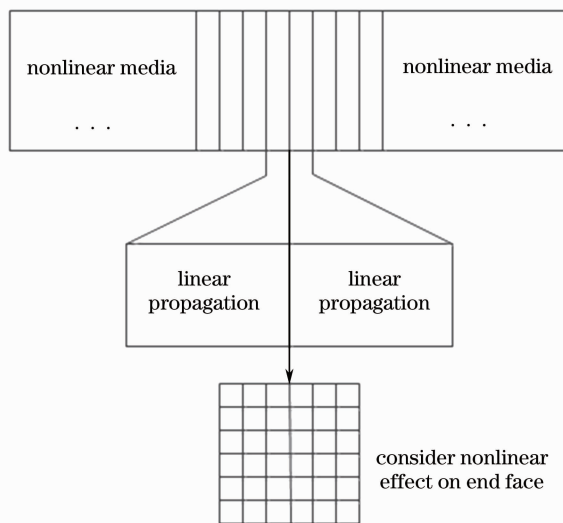


图 1 非线性介质的光追建模方法

Fig. 1 Ray-tracing modeling method of nonlinear media

### 2.2 非线性介质与线性介质混合追迹

非线性介质的追迹与线性介质的追迹有很大的不同。线性介质由于折射率不受光强调制,是固定值,给定了光线的初始条件,即确定了光线路径,因而可以对每一条光线从始至终进行单独追迹。而非线性介质由于在每个切片端面都必须考虑光强对折射率的调制,因而必须将所有光线追到同一个切片端面,同时需要追迹大量光线以减少光强统计误差。因此,编写了线性介质光追程序与非线性介质光追程序的接口模块,以实现两者的混合追迹,程序流程图如图 2 所示。

## 3 结果分析

以含有非线性介质 KDP 晶体的三片式聚焦系统为例进行分析,其系统光路图如图 3 所示。聚焦系统的入瞳直径为 100 mm,  $F$  数为 4.5。KDP 晶

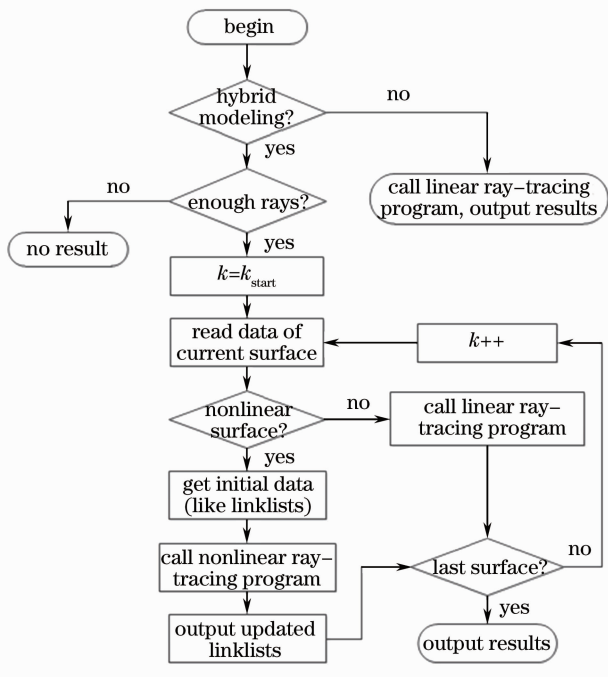


图2 接口模块程序调用流程图

Fig. 2 Flowchart of program calling of interface module  
 体的厚度为 30 mm (为厚介质), 口径为 20 mm × 20 mm, 在温度  $T=293$  K, 波长  $\lambda=1.053 \mu\text{m}$  时, 其线性折射率  $n_0=1.494151$ , 非线性折射率系数  $\gamma=6.15 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}^{[18]}$ 。

考虑到强激光系统对光束质量有十分严格的要求, 所以重点关注非线性效应对聚焦系统焦面处激光光束质量的影响。

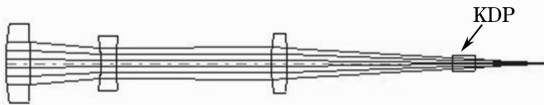


图3 含有非线性介质的聚焦系统光路示意图

Fig. 3 Schematic of the focusing system optical configuration with nonlinear media

### 3.1 光束质量评价标准

目前对远场激光光束质量的评价指标主要有  $M^2$  因子、焦斑尺寸、远场发散角或衍射极限倍数  $\beta$ 、Strehl 比以及环围能量比等<sup>[19-21]</sup>。在实际应用中, 需要根据不同的应用目的选择合适的评价方法。

本文采用焦斑尺寸和环围能量比这两个参数来进行光束质量评价, 并在获得仿真结果后, 以这两个参数作为优化操作数, 进行相应的系统优化设计。

#### 3.1.1 焦斑尺寸

焦斑尺寸指的是焦面上的光斑尺寸, 它可以整体反映光束质量, 但无法描述光束能量分布。焦斑尺寸作为评价标准, 可以形象而直观地反映焦面处

的光束质量。

通过点列图来表示焦面处的光斑尺寸, 由于点列图在计算过程中未考虑衍射效应, 因此与实际光斑有偏差, 但点列图代表了像差的大小, 能够反映光束质量的好坏, 因而可将其作为优化操作数, 来指导系统的优化。

#### 3.1.2 环围能量比

环围能量的定义是远场规定尺寸范围内所包围的光束能量占总能量的百分比, 可以全面反映光束的能量集中度。在实际应用中, 为了更全面地反映不同空间频段的能量分布情况, 常常会采用一系列规范尺寸中的能量多少来衡量能量集中度。美国国家点火装置(NIF)使用总能量的 50%, 80%, 90%, 95% 这 4 个能量分数作为规范尺寸<sup>[22]</sup>。

环围能量比的定义为

$$R_{\text{BQ}} = \sqrt{E_{\text{ideal}}/E_{\text{real}}}, \quad (4)$$

式中  $E_{\text{ideal}}$  为理想光束在靶面规定尺寸内所围能量,  $E_{\text{real}}$  为实际光束在靶面规定尺寸内所围能量。

### 3.2 仿真结果

参考 NIF 和我国的神光 III 装置对集中 95% 能量的光斑尺寸和远场发散角所作的规定, 将包含 95% 总能量所对应的衍射极限尺寸作为规范尺寸, 并主要关注这一规范尺寸内所包含的实际激光能量以及这一尺寸下的环围能量比(文中出现的规范尺寸均为此处定义的 95% 总能量所对应的衍射极限尺寸)<sup>[22]</sup>。

#### 3.2.1 不考虑非线性效应

聚焦系统的初始设计是在不考虑非线性效应的情况下使像质最优, 此时在聚焦系统焦平面将获得良好的光束质量, 点列图尺寸为  $0.024 \mu\text{m}$ , 如图 4 所示, RMS 表示均方根, GEO 表示几何。环围能量曲线如图 5 所示, 实际环围能量曲线与衍射环围能量曲线重合。同时根据环围能量计算结果以及(4)式, 计算得到规范尺寸下的环围能量比为 1.0000, 表明光束具有良好的能量集中度。



0.400

field: 0  
 RMS radius:  $0.024 \mu\text{m}$   
 GEO radius:  $0.112 \mu\text{m}$

Department of Optical Engineering  
 Zhejiang University

图4 不考虑非线性情况下点列图尺寸

Fig. 4 Spot size without consideration of nonlinear effect

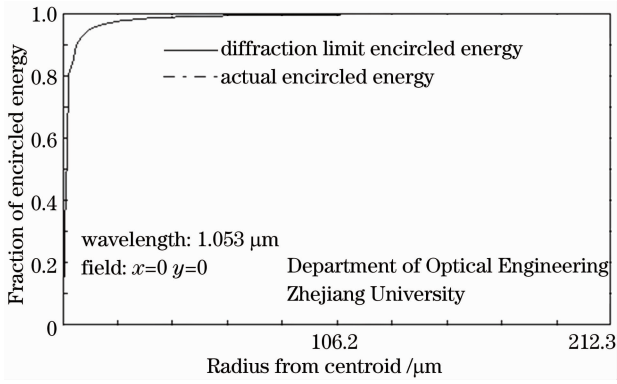


图 5 不考虑非线性情况下环围能量曲线

Fig. 5 Encircled energy curves without consideration of nonlinear effect

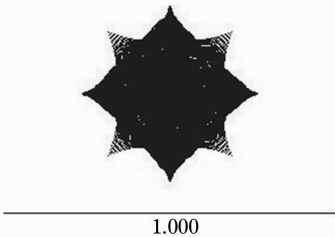
### 3.2.2 考虑非线性效应

在强激光系统中, KDP 晶体的折射率将受到光强调制而引起非线性效应。这种非线性效应会造成光束位相延迟, 从而导致光束波前畸变, 因此, 在焦面处得到的实际光束质量会比不考虑非线性效应时有所下降, 且光束质量的退化程度取决于非线性效应所引起的位相延迟的大小。非线性位相延迟量通常用  $B$  积分来表示, 其定义为<sup>[23]</sup>

$$B = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^L \gamma I(x, y, z) dz, \quad (5)$$

式中  $L$  为非线性介质长度。从(5)式中可以看出,  $B$  积分与非线性介质长度以及光强相关。因而, 本文选取了不同功率密度的光束用于非线性介质的光传输仿真, 以此研究不同强度的非线性效应对于光束质量的影响。

1) 设定 KDP 晶体入射端面处的光束功率密度为  $5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ , 此时  $\gamma I = 3 \times 10^{-7}$ , 呈现出较弱的非线性效应。此时点列图尺寸为  $0.166 \mu\text{m}$ , 变化量很小, 如图 6 所示。图 7 为环围能量曲线图, 可以



field: 0  
RMS radius: 0.166 μm  
GEO radius: 0.265 μm  
Department of Optical Engineering  
Zhejiang University

图 6 光束功率密度为  $5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时的点列图尺寸

Fig. 6 Spot size with beam power density of  $5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$

看出, 实际环围能量曲线与衍射环围能量曲线基本重合, 此时规范尺寸下的环围能量比为 1.0003, 光束依然具有良好的能量集中度。可见当非线性效应较弱时, 其对光束质量的影响可以忽略, 在原有焦面处仍然可以获得理想的光束质量。

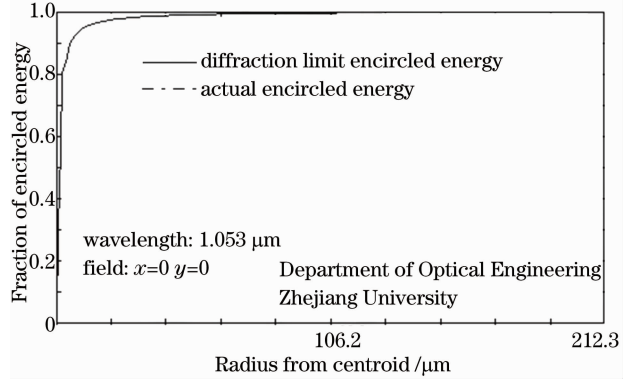


图 7 光束功率密度为  $5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时的环围能量曲线

Fig. 7 Encircled energy curves with beam power density of  $5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$

2) 当激光功率密度继续增大, 达到  $1.62 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$  时(KDP 晶体对于波长为  $1.053 \mu\text{m}$ , 脉宽为  $1 \text{ ns}$  的激光脉冲的损伤阈值为  $1.8 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$ ), 非线性效应所引起的非线性折射率变化将达到  $1 \times 10^{-5}$ <sup>[24]</sup>。此时, 非线性效应会使光束产生强烈的波前畸变, 点列图尺寸增大到  $5.337 \mu\text{m}$ , 如图 8 所示, 能量集中度明显下降, 如图 9 所示。规范尺寸下的实际环围能量仅为总能量的 75.6%, 环围能量比增大到 1.1210, 已经无法满足系统性能要求, 因此必须通过系统优化来改善光束质量。

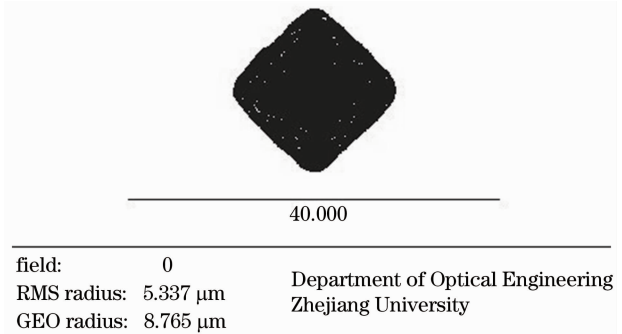


图 8 光束功率密度为  $1.62 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$  时的点列图尺寸

Fig. 8 Spot size with beam power density of  $1.62 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$

### 3.3 优化结果

根据仿真结果, 对激光功率密度达到  $1.62 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$  时的聚焦系统进行了优化设计。所用优化方法不需要重新设计光学系统, 在保证实际焦



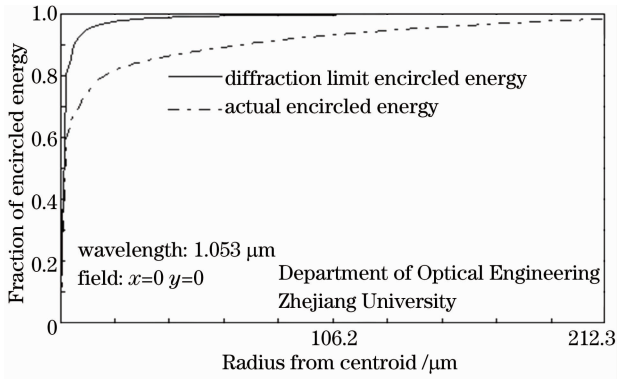


图9 光束功率密度为  $1.62 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$  时的  
环围能量曲线

Fig. 9 Encircled energy curves with beam power  
density of  $1.62 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$

面位置不改变的情况下, 仅将元件间隔作为补偿器, 以改善焦面处的光束质量。

通过将不同元件间隔补偿后的结果进行比较, 最终确定了系统的最佳优化方案。将第一、第二片透镜的间隔减小  $0.14 \text{ mm}$ , 同时将第三片透镜与 KDP 晶体的间隔增大  $0.14 \text{ mm}$ , 此时点列图尺寸从

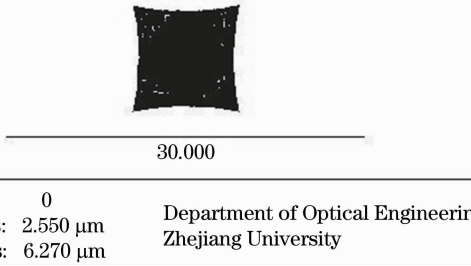


图10 优化后光束功率密度为  $1.62 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$  时的  
点列图尺寸

Fig. 10 Spot size after optimization with beam power  
density of  $1.62 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$

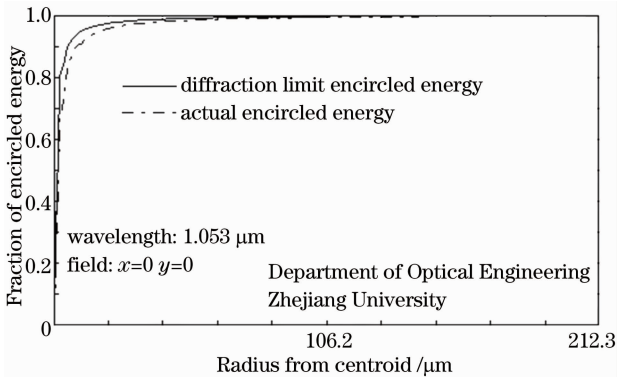


图11 优化后光束功率密度为  $1.62 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$  时的  
环围能量曲线

Fig. 11 Encircled energy curves after optimization with  
beam power density of  $1.62 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$

优化前的  $5.337 \mu\text{m}$  减小到了  $2.550 \mu\text{m}$ , 如图 10 所示。光束能量集中度改善明显, 如图 11 所示。规范尺寸下的环围能量达到总能量的  $91.8\%$ , 比优化前提高了  $16.2\%$ , 环围能量比达到  $1.0173$ 。

## 4 结 论

采用光线追迹的方法进行非线性光传输仿真, 并编程实现了线性介质与非线性介质的混合建模, 从而能够在考虑系统像差等因素的情况下对强激光非线性传输进行仿真分析。通过对强激光系统中不同激光功率密度下的非线性效应对光束质量的影响分析, 发现当激光功率密度大于一定值时, 非线性效应会引起光束质量严重退化, 难以满足系统性能要求。基于仿真结果, 提出了在不改变焦面位置的前提下, 将元件间隔作为补偿器的优化方法, 优化后焦面处的光束质量得到明显改善。研究对象为准连续光, 未来的工作还将考虑非准连续强激光的非线性退化及补偿。所使用的非线性传输仿真方法能够为强激光系统的优化设计和装调提供一定的依据。

## 参 考 文 献

- 1 A J Campillo, S L Shapiro, B R Suydam. Periodic breakup of optical beams due to self-focusing [J]. Appl Phys Lett, 1973, 23 (11): 628-630.
- 2 Chen Baosuan, Zhang Junyong, Zhang Yanli, *et al.*. Study of small-scale self-focusing in high-power laser system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(1): 010002.  
陈宝算, 张军勇, 张艳丽, 等. 高功率激光系统中的小尺度自聚焦研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(1): 010002.
- 3 Li Fuquan, Han Wei, Wang Fang, *et al.*. Research status of final optics assembly in high-power laser facility [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(6): 060002.  
李富全, 韩伟, 王芳, 等. 高功率激光驱动器终端光学组件研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(6): 060002.
- 4 M D Feit, J A Fleck Jr. Beam nonparaxiality, filament formation, and beam breakup in the self-focusing of optical beams [J]. J Opt Soc Am B, 1988, 5(3): 633-640.
- 5 Alessandro Ciattoni, Paolo Di Porto, Bruno Crosignani, *et al.*. Vectorial nonparaxial propagation equation in the presence of a tensorial refractive-index perturbation [J]. J Opt Soc Am B, 2000, 17(5): 809-819.
- 6 D Subbarao, H Singh, R Uma, *et al.*. Computer simulation of laser-beam self-focusing in a plasma [J]. J Plasma Phys, 1999, 61(3): 449-467.
- 7 G M Muslu, H A Erbay. Higher-order split-step Fourier schemes for the generalized nonlinear Schrödinger equation [J]. Math Comput Simulat, 2005, 67(6): 581-595.
- 8 Rafael Godoy-Rubio, Sebastián Romero-García, Alejandro Ortega-Moñux, *et al.*. Nonlinear wide-angle beam propagation method using complex Jacobi iteration in the Fourier domain [J]. J Opt Soc Am B, 2011, 28(9): 2142-2148.
- 9 Wen Shuangchun. Research on Self-Focusing of Intense Laser Beams [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2001.  
文双春. 强激光非线性自聚焦效应研究[D]. 上海: 中国科学院

- 上海光学精密机械研究所, 2001.
- 10 Wen Shuangchun, Fan Dianyuan. Non-paraxial propagation of optical beams in nonlinear self-focusing media [J]. Chinese J Lasers, 2001, 28(12): 1066–1070.  
文双春, 范滇元. 非线性自聚焦介质中光束的非傍轴传输[J]. 中国激光, 2001, 28(12): 1066–1070.
  - 11 Dan Censor. Ray theoretic analysis of spatial and temporal self-focusing in general weakly nonlinear media [J]. Phys Rev A, 1977, 16(4): 1673–1677.
  - 12 J Kasparian, J Solle, M Richard, *et al.*. Ray-tracing simulation of ionization-free filamentation [J]. Appl Phys B, 2004, 79(8): 947–951.
  - 13 Hanhong Gao, Lei Tian, Baile Zhang, *et al.*. Iterative nonlinear beam propagation using Hamiltonian ray tracing and Wigner distribution function [J]. Opt Lett, 2010, 35(24): 4148–4150.
  - 14 Ruan Wangchao, Cen Zhaofeng, Li Xiaotong, *et al.*. Simulation and analysis of nonlinear self-focusing phenomenon based on ray-tracing [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(4): 044202.  
阮望超, 岑兆丰, 李晓彤, 等. 基于光线光学的非线性自聚焦现象的仿真分析[J]. 物理学报, 2013, 62(4): 044202.
  - 15 Robert W Boyd. Handbook of Laser Technology and Applications [M]. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2004. 161–162.
  - 16 W Lee Smith. CRC Handbook of Laser Science and Technology [M]. Boca Raton: CRC Press, 1986. 259–264.
  - 17 Guo Qi, Ren Zhanmei, Liao Changjun, *et al.*. Soliton propagation in optical waveguides made of media with non-central symmetry [J]. Acta Physica Sinica, 1991, 41(7): 1097–1105.  
郭旗, 任占梅, 廖常俊, 等. 非中心对称介质构成的光波导中的孤子传输[J]. 物理学报, 1991, 41(7): 1097–1105.
  - 18 R A Ganeev, I A Kulagin, A I Rysanyanskii, *et al.*. The nonlinear refractive indices and nonlinear third-order susceptibilities of quadratic crystals [J]. Optics and Spectroscopy, 2003, 94(4): 561–568.
  - 19 A E Siegman. Solid State Lasers [M]. New York: Springer US, 1993. 13–28.
  - 20 Du Xiangwan. Factors for evaluating beam quality of a real high power laser on the target surface in far field [J]. Chinese J Lasers, 1997, 24(4): 327–332.  
杜祥琬. 实际强激光远场靶面上光束质量的评价因素[J]. 中国激光, 1997, 24(4): 327–332.
  - 21 Jin Aijun, Hou Jing, Jiang Zongfu. Evaluation of the beam quality of supercontinuum source using supercontinuum  $M^2$  factor [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0502006.  
靳爱军, 侯静, 姜宗福. 使用超连续谱  $M^2$  因子评价超连续谱光源光束质量[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0502006.
  - 22 Zhao Junpu. Study on High Power Solid-State Laser Beam Quality Diagnosis [D]. Chengdu: Sichuan University, 2006. 12–16.  
赵军普. 高功率固体激光光束质量诊断方法研究[D]. 成都: 四川大学, 2006. 12–16.
  - 23 William W Simmons, John T Hunt, William E Warren. Light propagation through large laser systems [J]. IEEE J Quantum Electron, 1981, 17(9): 1727–1744.
  - 24 Atsushi Yokotani, Takatomo Sasaki, Kunio Yoshida, *et al.*. Extremely high damage threshold of a new nonlinear crystal Laarginine phosphate and its deuterium compound [J]. Appl Phys Lett, 1989, 55(26): 2692–2693.

栏目编辑: 史敏