

文章编号: 1001-4322(2007)09-1474-05

带宽对强光束非线性成像的抑制效应*

胡勇华¹, 王友文¹, 文双春¹, 卓 辉¹, 傅喜泉¹, 范滇元^{1,2}

(1. 湖南大学 计算机与通信学院, 长沙 410082; 2. 中国科学院 上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要: 宽频带激光驱动器中光束的传输与常规的窄带系统有很大区别。数值分析了宽带激光的成像这一非线性传输现象, 并与窄带激光的成像特性进行了比较, 发现宽带激光的热像位置和窄带激光基本相同, 但宽带激光的热像强度比窄带激光低很多, 说明宽带激光能很好地抑制非线性成像的形成。此外, 通过改变脉冲啾啾和脉冲宽度两种方式分别揭示了带宽对非线性成像和光束匀滑的影响, 发现不同带宽情形下热像的位置基本相同, 均处于共轭位置处; 热像的光强和热像处光束的调制对比度随着啾啾值的增大而降低, 随脉冲宽度的增大而增大。由于受到群速度色散效应的作用, 带宽能够阻碍热像的形成, 并提高光束的匀滑度。

关键词: 非线性光学; 高功率激光; 宽带光束; 非线性成像; 传输; 抑制

中图分类号: O437.5 **文献标识码:** A

高功率超强激光是高能密度科学如激光核聚变、强场物理和等离子体研究的重要工具。在用于激光聚变研究的高能量钕玻璃激光系统中, 放大介质的非线性效应会导致高强度热像的形成, 这种非线性成像达到的峰值强度可能破坏光学元件, 从而对激光系统的安全运行构成严重威胁并阻碍激光驱动器负载的提高^[1-2]。所以对非线性成像的研究将有助于我们采取措施以控制光传输过程带来的光束波面的畸变和近场强度调制, 提高激光系统的安全运行性能, 降低运行和维护费用。另一方面, 由于高能密度科学需求的多样性和不确定性, 要求高功率激光驱动源具备多参数、大跨度的调节能力, 多功能兼容以及灵活的适应能力。为应对这一严峻的挑战, 需要发展全新的以“全系统宽频带激光技术”为核心的总体技术路线。这种新型多功能高功率激光系统中光束的传输、衍射、自聚焦、放大和靶面焦聚等效应和常规的窄带系统有很大不同, 研究相关的理论和定量计算方法对于总体设计、系统分析和性能优化具有重要现实意义。基于窄带光束, 人们对热像进行了研究^[1-8], 发现产生热像的根源是小尺度调制的非线性增长^[9-12]。本文研究高功率激光驱动器中宽带激光脉冲的热像规律, 通过与已有窄带光束的热像特性进行对比, 找出光束带宽对非线性成像的影响。

1 非线性成像的理论和计算模型

非线性成像的基本原理见图 1, 一束强激光依次通过两个光学元件, 其中第二个元件是非线性介质(如某片放大介质)。如果在第一个元件上有一个小的模糊斑 (obscuration), 那么强光入射到该模糊斑上将产生一个散射波, 背景光和散射光入射到非线性介质上, 由于介质的非线性而产生透镜效应, 从而将光束的部分能量聚集到下游的一个焦点上, 这个焦点就像是上游元件上的模糊斑的实像, 如果在该像平面正好有另一元件, 那么该元件有可能遭破坏, 尽管系统运行在一个保证前两个元件安全的光强下。这种非线性成像过程与光全息成像现象相似, 所以又叫非线性全息成像^[1-4]。在非线性成像过程中, 非线性介质充当了正透镜的角色, 同时又由于自聚焦效应使小尺度调制(如模糊斑)的强度获得增长^[9-14], 从而使热像的强度高于原来的小尺度调制。小尺度自聚焦的严重程度通常用 B 积分来度量, 所以, 热像的强度也与光束通过非线性介质时累积的 B 积分有关。

为了便于比较并突出带宽对光束热像的影响, 基于图 1 采用接近实际的参数分别考察窄带光束和不同带宽的宽带光束的热像情况。从图 1 可以看出, 脉冲的传输过程由介质前和介质后的自由空间传输和介质内的

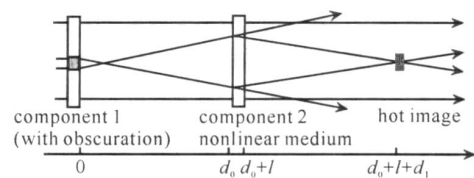


Fig. 1 Schematic illustration of hot image formation

图 1 非线性成像示意图

* 收稿日期: 2007-03-15; 修订日期: 2007-07-17

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(10576012, 60538010); 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 胡勇华(1981—), 男, 湖南人, 博士研究生, 主要研究方向为高功率宽频带激光的传输和放大; hyhyt@126.com。

联系作者: 文双春, scwen@vip.sina.com。

非线性传输两种过程组成。设第一个元件(调制面)上有一根挡光细丝,它对光束进行线状的幅度或相位调制, d_0 为调制面到非线性 Kerr 介质入射面的距离,介质长度为 l , d_1 为介质出射面到成像面的距离。高功率激光系统中宽带脉冲的传输满足演化方程

$$\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{i}{2\beta_0} \nabla^2 U - i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} U + iB_0 |U|^2 U \tag{1}$$

式中: $U(x, y, z, t)$ 是用入射脉冲的峰值功率 P_0 归一化的脉冲包络; $\beta_0 = n_0 \omega / c$, 是波矢量; β_2 是介质的群速度色散系数; $B_0 = \omega n_2 P_0 / n_0$, n_0 和 n_2 分别表示介质片的线性折射率和非线性折射率系数; $\nabla^2 = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2$ 是横向 Laplace 算符。对于介质外的自由空间传输,仍然满足方程(2),但此时色散和非线性项为 0。需要注意的是,这里的 B_0 主要是为了与窄带光束情形进行对比,它仅能反映入射脉冲的最大光强部分在介质内所对应的非线性效应而不能完全反映脉冲的小尺度调制通过非线性介质后的增益。

设入射宽带光束在时间上是高斯型,空间分布是超高斯型

$$U(0, r, t) = \exp(-t^2/2\tau_0^2) \exp[-0.5(r/r_0)^{2n}] \tag{2}$$

式中: $r^2 = x^2 + y^2$, τ_0 和 r_0 分别是脉冲时间半宽度和空间半宽度, n 是超高斯阶数。文中入射无啁啾脉冲的中心波长 $\lambda_0 = 1.053 \text{ nm}$, 带宽 $\Delta\lambda = 10 \text{ nm}$, $n = 4$ 。此宽带脉冲被一根细丝在中心位置幅度调制,其数学描述为

$$G = \begin{cases} \phi_0 & |x| \leq w/2 \\ 0 & |x| > w/2 \end{cases} \tag{3}$$

其中 ϕ_0 是振幅调制幅度比且为 1,调制区域的宽度 $w = 175 \text{ }\mu\text{m}$ 。调制后的脉冲经过 1.05 m 的自由空间传输后到达非线性介质。非线性介质的线性折射率 $n_0 = 1.528$,非线性折射率系数 $n_2 = 1.29 \times 10^{22}$,群速度色散系数 $\beta_2 = 2.4 \times 10^{-26} / (\text{Hz}^2 \cdot \text{m})$ 。

2 宽带脉冲非线性成像特性分析

2.1 宽带和窄带脉冲的非线性成像特性比较

非线性成像是一个非常复杂的非线性过程,解析处理非常复杂,而数值模拟仿真是重要的分析手段。我们基于上节的物理模型对宽带和窄带脉冲的非线性成像进行了数值模拟计算。为了与窄带脉冲的情况对比,取光束空间全宽 18 mm ,非线性介质厚度为 $250 \text{ }\mu\text{m}$ 。假定入射脉冲的峰值功率与一般窄带光束的峰值功率相近,则调制之前的脉冲在非线性介质中对应的 B_0 约为 $8.28 / \text{m}$ 。图 2 给出了窄带和取默认参数值的无初始啁啾宽带光束横向剖面上的最大光强和中心光强随传播距离 z 的变化。为便于比较,窄带和宽带脉冲在完全自由空间传播(无非线性介质)情形下的光强变化也示于图中,光强已用入射变换极限脉冲的峰值功率归一化。

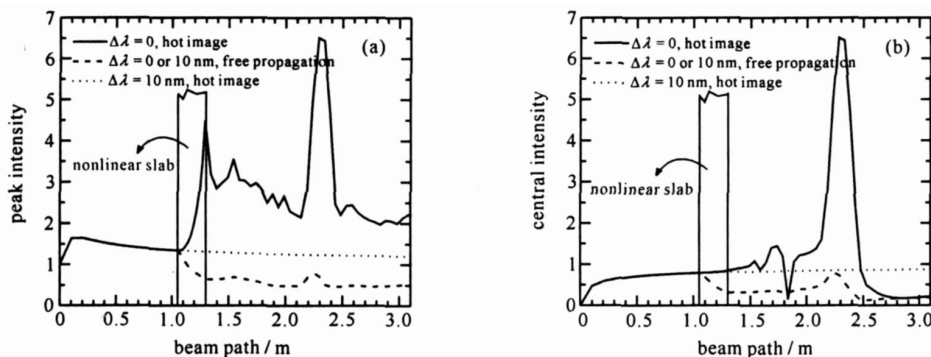


Fig. 2 Evolution of peak intensity (a) and central intensity (b)

图 2 窄带和宽带光束横向剖面上的最大光强(a)和中心光强(b)随传输距离的变化

图 2(a) 中窄带光束的热像计算结果与文献[2]完全相同。对比图 2(a) 和 (b) 可以发现,无论是窄带还是宽带光束,在某一传播距离处其横向剖面上的最大光强并不一定是中心光强,而最大光强对元件而言是最危险的,找出光路上最大光强的位置和大小是我们关注的重点。这里分别比较宽带和窄带光束在热像的 3 个传输阶段的异同。从图 2(a) 可以看出,从调制面到非线性介质入射面的第一阶段自由空间传播,宽带光束与窄带光束的最大光强变化规律相同,说明 20 nm 的带宽对光束的自由空间传播影响很小^[15];在介质内部的非线性传播阶段,窄带脉冲的最大光强经历了一个上升的过程,而宽带脉冲的最大光强却经历了一个下降的过程。导致这种结果的原因,我们认为:对于窄带脉冲在非线性介质内的传输,它只有衍射和非线性两种效应,由于非线

性强于衍射效应,光束在介质内将产生自聚焦,包括小尺度自聚焦,从而使最大光强随传播距离增加;而对于宽带脉冲,它在非线性介质内传输时还受到群速度色散效应的影响,群速度色散导致脉冲展宽并抑制非线性自聚焦作用^[16],如果带宽足够宽或群速度色散特别大,尽管非线性强于衍射效应,但由于色散的作用,自聚焦增长将被完全抑制,从而使最大光强随传播距离减少。需要指出的是,如果入射到非线性介质的宽带脉冲光束功率足够高或者带宽较小,以致使非线性效应强于群速度色散和衍射的联合效应,其最大光强将会随传输距离而增加(在下一小节将揭示)。但从图 2(a)的结果可以推知,相同的初始峰值功率下,宽带光束的最大光强肯定比窄带光束小。宽带脉冲经过非线性介质后的第二阶段自由空间传输,它的最大光强比窄带光束低得多,甚至比完全自由空间传输情形还要低。与窄带光束一样,宽带光束的热像,即第二阶段自由空间传输路径上的最大光强,也基本上位于调制面的共轭位置处(图 2 中传输距离 $z = 2.3 \text{ m}$ 处)。但宽带光束热像的强度比窄带光束低得多,且明显不符合窄带脉冲热像峰值功率要达到初始峰值功率的 $1 + B^2$ (B 是 B 积分值)倍这个规律。因为如果要满足此关系,热像功率就应该接近 6,但图 2 中宽带脉冲在成像处的功率不到 1,已经低于初始峰值功率,这说明宽带光束能很好地抑制非线性成像的形成。

为了说明宽带脉冲的热像特性,我们还给出了宽带脉冲在入射面以及在有和无非线性介质两种情况下调制面的共轭位置处的光场分布的数值结果,如图 3 所示。图 3(a)是入射处脉冲,图 3(b)和(c)分别是 $z = 2.3 \text{ m}$ (即共轭位置)处有非线性介质和完全自由空间传输的结果。图像的横向为脉冲的空间坐标,纵向为时间坐标,且越亮表示相对强度越大。图 3 表明,在有非线性介质情形下,由于介质的色散效应,使宽带脉冲在热像处在时间上有了很大程度的展宽,且大部分能量在中央亮条纹之外,从而导致最大强度显著降低。

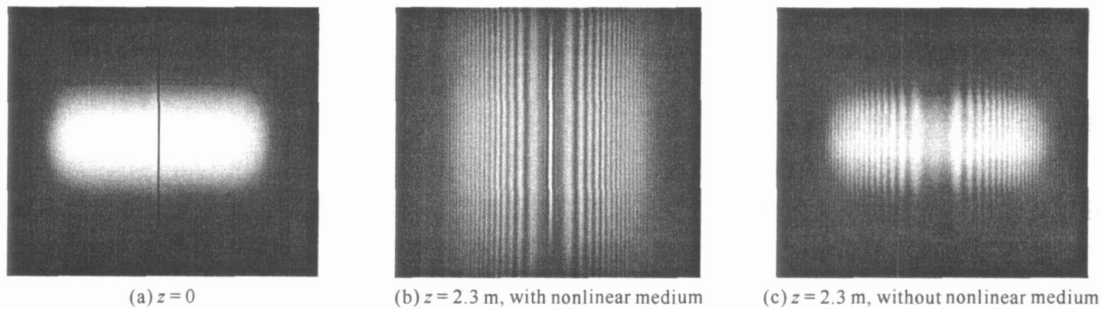


Fig. 3 Normalized intensity distribution of broadband pulse at different distance

图 3 不同位置处宽带脉冲的光场分布

宽带光束抑制非线性成像形成的物理原因可进一步解释如下。热像形成的基本物理机制是小尺度自聚焦。宽带光束经过非线性介质时,一方面小尺度自聚焦效应导致脉冲内达到自聚焦临界功率的各衍射调制条纹发生小尺度自聚焦而峰值功率增加、出射条纹变细变窄,另一方面正常色散使脉冲在时间域内展宽、自相位调制产生啁啾从而加速脉冲时域展宽,它们导致峰值功率下降并削弱自聚焦效应^[16],使出射条纹变粗变宽。由于在计算中为了与已有的关于单色光束热像的结果进行比对,取了与之相似的参数,在这种峰值功率相对较低、介质长度较长从而色散效应相对更强的情况下,空间聚焦带来的峰值功率的增长抵消不了色散展宽造成的峰值功率的降低,从而图中介质内脉冲的能量在时间上分布趋于均匀,峰值功率下降,热像的强度降低。此外,宽带脉冲可看成是由许多不同频率的单色光组成,脉冲经过色散介质后由于自相位和交叉相位调制效应使各频率成份的相位改变会有较为显著的差别,在通过介质后的第二阶段衍射过程中,各频率成份的衍射条纹的明暗条纹会有部分甚至完全重合,从而导致叠加的结果使光束变得相对平滑。

2.2 带宽对非线性成像的影响

前面的计算结果说明宽带光束与窄带光束的热像特性有很大不同。我们进一步从改变脉冲啁啾和脉冲宽度两方面来定量揭示带宽对热像的影响。与前面的计算参数不同,这里提高光束的入射功率并减小介质的长度,以更符合宽带高功率激光系统的实际情况,并减少介质色散的影响,从而更突显纯粹带宽对热像的影响。取非线性色散介质厚度为 0.1 m ,入射脉冲的峰值功率的取值保持在非线性介质中对应的 $B_0 = 50/\text{m}$,同时将空间口径缩小一半。设入射的啁啾脉冲光束形式为

$$U(0, r, t) = \exp[-(1 + iC)^2 / 2 \cdot \frac{r^2}{\omega_0^2}] \exp[-0.5(t/\tau)^{2n}] \quad (4)$$

其中 C 是初始啁啾参量。对应的频率域表达式可写成

$$\bar{U}(0, r, z) = \exp(-r^2/2\sigma_0^2) \exp[-0.5(r/\sigma_0)^{2n}] \tag{5}$$

根据高斯脉冲频谱半宽和啁啾的关系式， $\sigma_0 = \sqrt{(1+C^2)}/\omega_0$ ，可知 C 越大或者 ω_0 越小意味着入射脉冲的越大。当宽带脉冲在色散介质中传输时，群速度色散导致脉冲展宽从而使峰值功率降低并削弱自聚焦效应；当加上啁啾或进一步缩短脉冲的时间宽度时，脉冲的展宽将加速，使得同样多的能量分散在更长的时间段上而进一步降低峰值功率，从而对自聚焦效应削弱得更严重并使空间调制波纹的最大强度变低，空间宽度变大。结合前面对 2.1 节自由空间传输过程的分析，这说明热像强度必将得以进一步减弱。

图 4 是保持初始 ω_0 不变，啁啾 C 取不同值时光束的最大光强和空间调制对比度随传输距离的变化，它反映了啁啾型带宽的影响。这里引入对比度是为了考察带宽对光束匀滑的影响，它尤其对比较不同功率的光束传输规律有较大意义。我们定义：对比度 = 最大光强/平均光强。图 5 是初始啁啾 $C=0$ 而 ω_0 取不同值时光束的最大光强和空间调制对比度随传输距离的变化，它反映了变换极限带宽的影响。图 4 和图 5 中的实线、虚线、点线对应的等效入射 ω_0 分别大约为 10, 15, 20 nm。从图 4 和图 5 可以看出，不同带宽情形下热像的位置基本相同，均处于共轭位置处；热像的光强随着啁啾值的增大而降低，随脉冲宽度的增大而增大。这些现象充分说明带宽能够阻碍热像的形成。热像处的对比度随脉冲啁啾和脉冲宽度的变化趋势与最大光强相同，这说明带宽还能使光束匀滑。值得注意的是，在非线性介质内部，不同带宽情形下的对比度都是随传输距离增加，而光束的最大光强则不完全如此，这说明带宽使光束匀滑的效果不如抑制自聚焦显著。另外，图 4 和图 5 还反映了通过改变脉冲宽度来改变带宽比通过改变啁啾来改变带宽对热像的影响要大。例如，图 4 和图 5 中的点线都表示等效的 ω_0 是 10 nm，但图 5 中其相应的像的强度和对比度都要小许多。根据色散长度的定义 $L_d = \lambda^2/|k''|$ 可知，这主要是因为缩短脉冲时间宽度会增加有效带宽的同时还会使色散长度减小，从而使增加啁啾对非线性成像的抑制效果不如减小脉冲时间宽度带来的抑制效果明显。

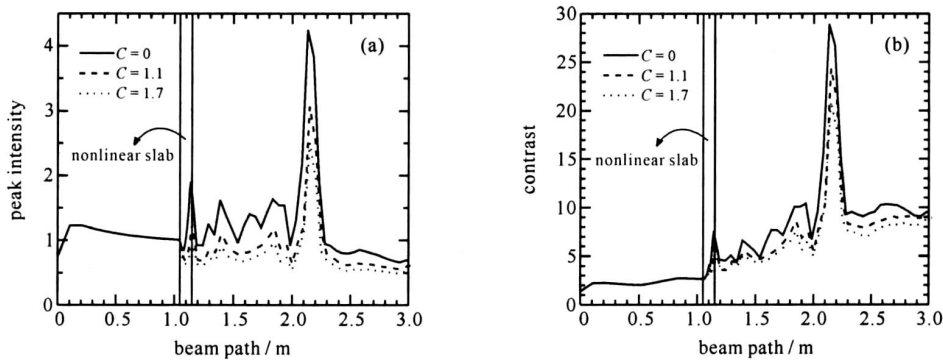


Fig. 4 Influence of initial temporal chirp on peak intensity (a) and contrast of the pulse (b)

图 4 不同初始啁啾的宽带光束的最大光强 (a) 和对比度 (b) 随传输距离的变化

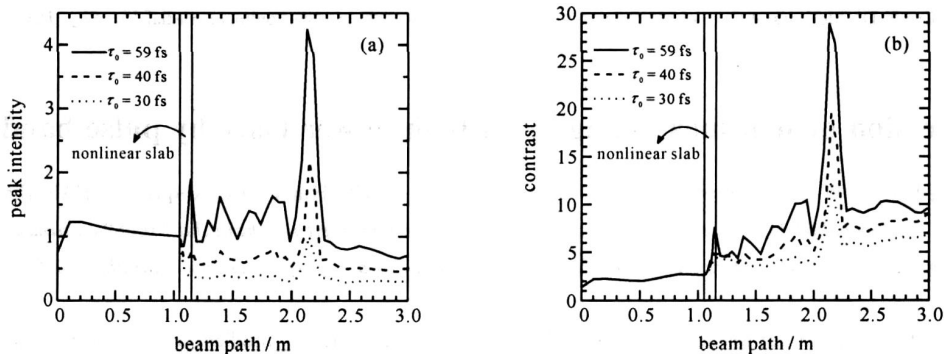


Fig. 5 Influence of initial pulse duration on peak intensity (a) and contrast of the pulse (b)

图 5 不同初始脉宽的宽带光束的最大光强 (a) 和对比度 (b) 随传输距离的变化

3 结 论

我们基于与窄带光束热像相同的物理模型，数值分析了宽带激光的非线性成像现象，并与窄带激光的热像特性进行比较，发现宽带激光的非线性成像位置和窄带激光基本相同，但宽带激光的热像强度比窄带激光低很

多,说明宽带激光能很好地抑制非线性成像。通过改变脉冲啾啾和脉冲时间宽度两种方式分别揭示了带宽对热像和光束匀滑的影响,发现不同带宽情形下热像的位置基本相同,均处于共轭位置处;热像的光强和热像处光束的调制对比度随啾啾值的增大而降低、随脉冲宽度的增大而增大。这些结果进一步说明一定的带宽能够阻碍热像的形成,并提高光束的匀滑度。所以,宽带光束在受到光场幅度调制时的热像效应对非线性介质片和后续光学元件损伤的能力与窄带光束相比是比较小的。这些结果不仅对全系统宽带激光系统,而且对以啾啾脉冲放大为技术路线的皮秒高能激光系统的设计和安全运行都具有一定的现实意义。

参考文献:

- [1] Hunt J T, Manes K R, Renard P A. imagings from obscurations[J]. *Appl Opt*, 1993, **32**:5973-5982.
- [2] Williams W H, Manes K R, Hunt J T, et al. Modeling of self-focusing experiments by beam propagation codes[R]. Livermore CA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1996.
- [3] Widmayer C C, Milam D, DeSzoek S P. Nonlinear formation of holographic images of obscurations in laser beams[J]. *Appl Opt*, 1997, **36**:9342-9347.
- [4] Widmayer C C, Nickels M R, Milam D. Nonlinear holographic imaging of phase errors[J]. *Appl Opt*, 1998, **37**(21):4801-4805.
- [5] Xie L P, Jing F, Zhao J L, et al. Nonlinear hot-image formation of an intense laser beam in media with gain and loss[J]. *Opt Commun*, 2004, **236**:343-348.
- [6] 谢良平,赵建林,粟敬钦,等.位相调制产生“热像”效应理论研究[J].物理学报,2004,**53**:2175-2179.(Xie L P, Zhao J L, Su J Q, et al. Theoretical analysis of imaging effect from phase scatterer. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(7):2175-2179)
- [7] Xie L P, Zhao J L, Jing F. Second-order imaging from a scatterer in high-power laser systems[J]. *Appl Opt*, 2005, **44**:2553-2557.
- [8] 谢良平,粟敬钦,景峰,等.高功率激光系统中全息“热像”效应[J].强激光与粒子束,2004,**16**:571-574.(Xie L P, Su J Q, Jing F, et al. Nonlinear hot holographic image in high power solid state laser systems. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**:571-574)
- [9] 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.(Wen S C. Research on self-focusing of intense laser beams. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2001)
- [10] 文双春,钱列加,范滇元.强光束局部小尺度调制致多路成丝现象研究[J].物理学报,2003,**52**(7):1640-1644.(Wen S C, Qian L J, Fan D Y. A study on multiple filamentation of locally modulated laser beams. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(7):1640-1644)
- [11] 文双春,范滇元.增益(损耗)介质中高功率激光束的小尺度自聚焦理论研究[J].物理学报,2000,**49**:1282-1286.(Wen S C, Fan D Y. Theory of small-scale self-focusing of intense laser beams in media with gain and loss. *Acta Physica Sinica*, 2000, **49**:1282-1286)
- [12] 文双春,范滇元.高功率激光放大器中光束的成丝和B积分[J].光学学报,2001,**21**:1331-1335.(Wen S C, Fan D Y. Filamentation of intense laser beam in high power laser and the B integral. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**:1331-1335)
- [13] Bespalov V I, Talanov V I. Filamentary structure of light beams in nonlinear liquids[J]. *JETP Lett*, 1966, **3**:307-310.
- [14] 刘红婕,景峰,左言磊,等.高功率激光装置中局部波前畸变的非线性传输[J].强激光与粒子束,2006,**18**(11):1850-1854.(Liu H J, Jing F, Zuo Y L, et al. Nonlinear propagation of localized wavefront deformation in high-power laser facility. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(11):1850-1854)
- [15] You K M, Wen S C, Fan D Y. Study on modulation property of broadband laser propagation in free space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**:965-970.
- [16] Liou L W, Cao X D, McKintsrie C J, et al. Spatiotemporal instabilities in dispersive nonlinear media[J]. *Phys Rev A*, 1992, **46**:4202-4208.

Suppression of nonlinear imaging in high-power laser by pulse bandwidth

HU Yong-hua¹, WANG You-wen¹, WEN Shuang-chun¹, ZHUO Hui¹, FU Xi-quan¹, FAN Dian-yuan^{1,2}

(1. School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: The formation of hot image in a broadband laser system is numerically studied. It is found that in a broadband system the hot image is, though the same in location, well restrained by the bandwidth and has a peak intensity much smaller when compared to that in a narrowband system. In addition, the quantitative description for the influences of bandwidth on the hot image and on the uniformity of the beam is presented by modifying the chirp and temporal width of pulse. The results show that the intensity of the hot image and the corresponding contrast are inversely proportional to the chirp and proportional to the temporal width of the incident pulse, indicating that a bandwidth can suppress the formation of a hot image and improve the uniformity. The physical reasons for such a suppressing effect are also discussed.

Key words: Nonlinear optics; High-power laser; Broadband laser; Nonlinear imaging; Propagation; Suppression