

宽频带光束非线性热像效应的实验研究*

王友文¹⁾²⁾ 邓剑钦¹⁾ 文双春^{1)†} 唐志祥¹⁾ 傅喜泉¹⁾ 范滇元¹⁾

1) 湖南大学计算机与通信学院微纳光电器件及应用教育部重点实验室,长沙 410082)

2) (衡阳师范学院物理与电子信息科学系,衡阳 421008)

(2008 年 6 月 24 日收到,2008 年 8 月 4 日收到修改稿)

实验研究宽频带脉冲光束通过非线性介质时的非线性热像的形成过程,揭示了光束入射功率和脉冲宽度、介质厚度等因素对热像光强和位置的影响.结果表明,与单纵模激光束一样,在宽频带脉冲光束情形下,非线性介质上游元件的模糊斑调制也可导致在下游共轭位置形成热像.热像光强随入射光束功率的增加而增加,若脉冲能量一定,则热像光强随脉冲宽度的增加而减弱,若脉冲峰值功率一定,则热像光强随脉冲宽度的增加而增强.

关键词:高功率激光,热像,宽带光束,小尺度自聚焦

PACC:4265J,4260,4260K

1. 引 言

上世纪 70 年代在美国利弗莫尔国家实验室的 NOVA 高功率激光系统中发现,即使系统工作在通常安全的光通量下,在某些特殊位置的元件也遭到损伤.这种损伤威胁激光系统的安全运行,阻碍驱动器负载的提高,曾困扰高功率激光系统的操作人员达二十多年.直到 1993 年 Hunt 等人对这种现象才给出了比较合理解释,他们指出,高强度激光通过光学系统时,上游光学元件上的污点或缺陷等衍射物(Obscurations)引起的衍射光与主光束在下游非线性光学元件中相互作用,由于非线性光学元件的折射率依赖于光强,主光束中一部分光被折射,可以在非线性元件的下游形成衍射物的高强度的像,称之为“热像(hot image)^[1-4],其强度可以达到元件的损伤阈值.从本质上来说,非线性热像的形成是小尺度自聚焦的一种特殊形式^[2,4-10]. Hunt 等人基于小尺度自聚焦的 Bespalov-Talanov (B-T)理论分析了热像效应的形成机理,得到热像位置及强度与 B 积分的关系^[1].此后,Williams 等人从实验和数值模拟上研究了纳秒级准单色光的热像效应,基本验证了 Hunt 的理论结果^[2-4].文献 [11]研究了振幅、相位混合型调

制的非线性热像,文献 [12]预言了二级热像.文献 [13]研究了一定厚度介质非线性热像的位置及强度随衍射物调制系数等的变化关系.最近,文双春等人研究了有限宽度光束的热像效应以及热像随模糊斑的尺寸和介质厚度的变化规律^[14-16].所有这些研究都是针对准单色光束的热像效应.

本文实验研究宽频带光束的热像效应.宽频带激光系统是目前高功率固体激光驱动器的一个重要发展方向^[17-20].例如,以啁啾脉冲放大为技术路线的皮秒高能激光系统是进行快点火研究的重要工具,同时也是一个典型的宽频带激光系统;此外,已有的研究表明,常规的钨玻璃驱动器主激光系统若采用宽频带激光传输不仅能有效地改善靶面照明均匀性,而且对激光系统本身也有很多好处,如宽频带激光可以取得比常规光束更高的放大效率,衍射、干涉效应被显著抑制,光噪声(小尺度调制)减小,自聚焦效应减弱,B 积分限制可明显放宽,从而使总体性能、输出能力得到较大提高,因此,宽带主激光系统具有潜在的发展前景,开展宽带主激光系统中光束的非线性传输研究是有实际意义的.对单纵模光束热像的形成机理和规律已比较清楚了,但宽带主激光系统中光束的热像效应还处于探索阶段.宽频带光束通过非线性介质时是否会产生热像?若然,热

* 国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金资助课题(批准号:10576012) 国家高技术研究发展计划(863 计划)惯性约束聚变领域资助的课题,湖南省自然科学基金(批准号:08jj3001)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: scwen@vip.sina.com.

像的位置与强度与各种参数关系如何?为回答上述问题,我们利用商用飞秒激光器实验研究了宽频带脉冲光束经过单片非线性克尔介质的热像效应,着重观察了热像形成过程,并考察了热像位置及光强随入射光束平均功率和脉冲宽度、介质厚度、以及模糊斑大小等参数的变化规律. 所得结果可为规范、保养及适当排布高强度宽频带脉冲激光系统中的光学元件,保证系统安全运行提供参考.

2. 实验装置

考察宽带光束通过非线性介质热像效应的实验装置如图 1 所示. 激光源为相干公司的 Libra 钛宝石飞秒激光器,其输出脉冲时间上为近高斯分布,脉冲的半高全宽为 120 fs,对应的带宽约 12 nm,单脉冲能量 1 mJ,中心波长 800 nm,最高重复率 1 kHz,光束的空间轮廓也为近高斯分布,半高全宽约 6.0 mm. 光束先经固定镀膜滤光片,再经可调节条状中性密度滤光片衰减后,入射到宽度约 0.2 mm 的作为强度的细丝(相当于模糊斑或散射物),与文献[2]一样,

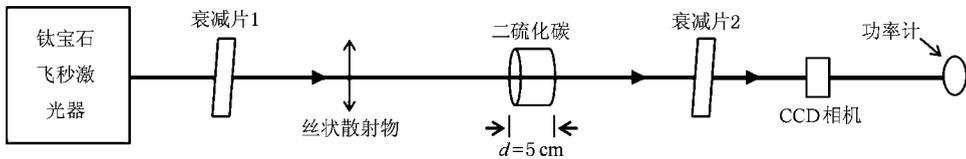


图 1 宽带光束通过单片非线性介质热像效应实验装置示意图

3. 实验结果与分析

3.1. 热像形成过程观察

图 2 所示为光束经过非线性介质后其峰均比光强(I_{pa})随传输距离(离非线性介质后表面的距离 d_2)的变化曲线,其中输入平均功率为 $P = 150$ mW,脉冲宽度 120 fs,散射细丝离非线性介质前表面的距离为 $d_1 = 100$ cm. 从图中可以看出,在非线性介质 CS_2 后面 $d_2 \approx 100$ cm处有一峰均比光强极大值,对应所谓的热像. 图 3 所示为热像所在平面内的光强分布图及其对应的轮廓图,其中图 3(a)为没有放置非线性介质 CS_2 时距离细丝 200 cm处(热像所在位置)的光强分布,显然,没有放置非线性介质 CS_2 时,此处光强分布为细丝的衍射图样,图样的中心

选择细丝作为模糊斑是因为它相对于点状模糊斑便于悬挂和操控,而选择细丝状或点状模糊斑对热像形成的基本规律没有影响. 之后,光束通过装有二硫化碳(CS_2)的玻璃管,玻璃管长度为 5.0 cm,两端用约厚 2.0 mm 的光学玻璃密封. 选择二硫化碳(CS_2)作为非线性克尔介质,是由于它的非线性系数比典型的高功率固体激光器中用的铍玻璃大得多^[3,4,21],因而用中等强度的激光可以产生较大的非线性相移,激光器运行在较弱强度可以最小化其他原件的非线性作用,也便于保持好的光束质量. 从非线性介质出射的光场再经过一固定中性密度滤光片衰减,通过放置在滑轨上的 CCD 相机记录其空间轮廓分布. 所用 CCD 相机是相干公司的 LaserCam-HR,通过 USB 接口直接连到 PC 机,PC 机所装的与该相机配套的 BeamView 软件可以分析光束的对比度、最大相对光强等空间特性参数,CCD 的区域尺寸是 8.5 mm × 6.8 mm,分辨率为 6.70 μ m × 6.70 μ m. 光束入射的功率与能量通过功率计(能量计)测量. 脉冲宽度用 FR-103MN 型自相关仪测量.

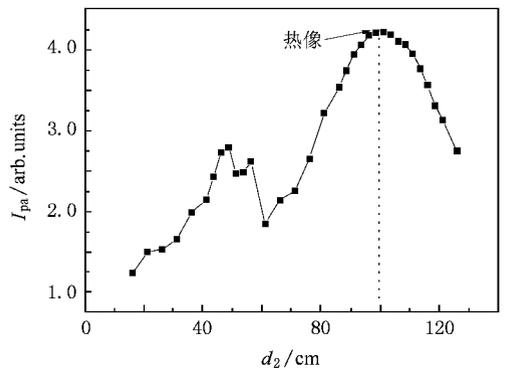


图 2 光束经过非线性介质后其峰均比强度沿传输距离的变化

是很暗的,并且随传输距离的增加,强度越来越弱,而中心区域的两侧有很多亮的旁瓣,靠近中心区域的第一对旁瓣最亮,比中心区域亮得多,但随着传输距离增加,旁瓣间距不断加宽,强度渐渐下降. 图 3

(c)为放置非线性介质 CS_2 后,在细丝关于非线性介质大致对称共轭的位置,即介质后 100 cm 处的光强分布图,可以看到很亮的中央亮条纹,对比图 3(a)可知,这是由于非线性介质放入所引起的非线性成像,即所谓的热像.在图 2 中非线性介质后 $d_2 \approx 48.1$ cm 处有一较弱的峰均比强度峰,为所谓的二级

热像^[12].在非线性介质后向远处移动 CCD 的过程中,衍射图样表现的行为是,各旁瓣先慢慢收缩,中央暗条纹也收缩,形成二级热像,之后,各条纹散开,二级热像也散开,再之后,各条纹中的一部分光向中央靠拢集中,形成热像,再往远处,热像散开,各旁瓣继续衍射散开减弱,间距加宽.

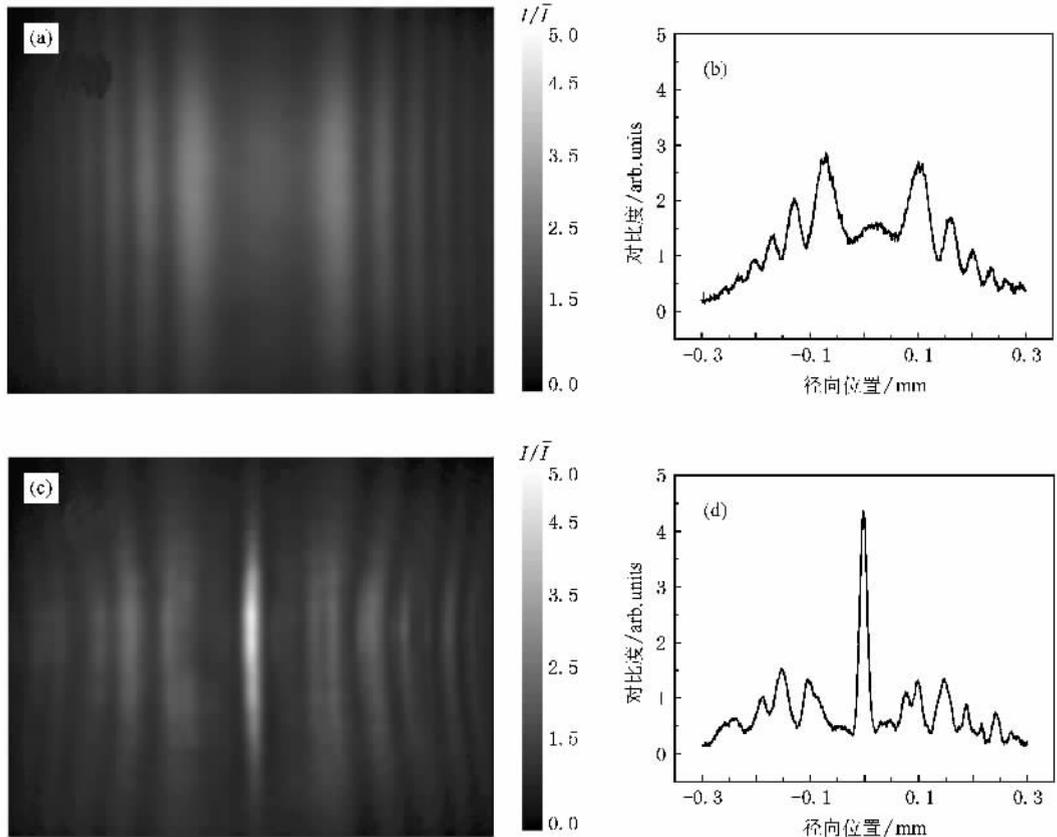


图 3 光场在非线性介质后 100 cm 处(热像位置)的光强二维分布((a)(c))及其对应的水平轴上的轮廓分布((b)(d))
(a)(b)无非线性介质 (c)(d)放置非线性介质

3.2. 各种参数对热像强度与位置的影响

3.2.1. 入射光束功率对热像的影响

图 4 所示为四个不同入射平均功率光束通过非线性介质后,轴上峰均比光强随传输距离的变化曲线.细丝放置在距非线性介质 CS_2 前面 $d_1 = 100$ cm 处.从图中可以看出,对于某特定入射平均功率,峰均光强沿传输轴有一极大值峰,该峰位于非线性介质后 $d_2 \approx 100$ cm 处,对应所谓热像.还可看出,随着入射光束功率的增加,热像峰均比光强增加.图 5 所示为热像强度随入射功率的变化图.从图中可以看出,随入射光束功率的增加,热像逐渐增强,这是由于入射光束功率增加相当于 B 积分增加,导致热

像峰均比相对光强增加,这与文献[1—4]及[11—14]的结果基本一致.与以前文献报道不同的是,当入射功率 P 达约 200 mW 时,热像光强趋于饱和,这是由于作为调制的衍射光在非线性介质中的增长是以抽取作为本底光场的背景光为代价的,当调制增长及本底光场下降到使二者相当时,调制的增长将饱和.入射光平均功率增加,使可抽取本底光场增加,但入射的衍射场本身也相应增加,所以,能够增长的倍数,即热像的峰均比光强饱和值基本相同.

3.2.2. 模糊斑到非线性介质前表面的距离对热像的影响

调节细丝到非线性介质前表面的距离 d_1 ,测量非线性介质 CS_2 后出射光束峰均比光强随传输距离

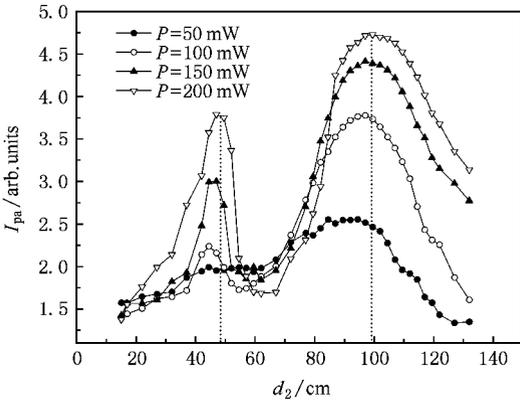


图 4 不同入射功率的光束通过非线性介质后峰均比光强随传输距离的变化

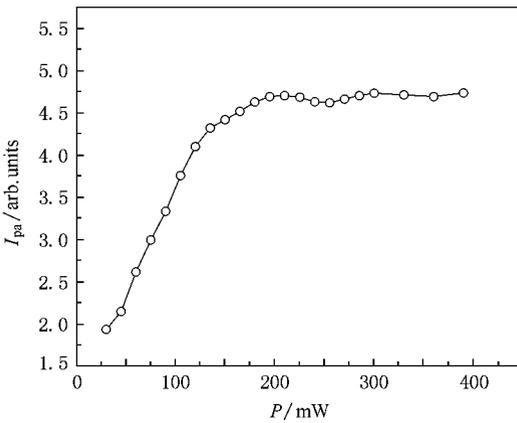


图 5 热像峰均比光强随光束入射功率 P 的变化

的变化,结果如图 6 所示,其中入射光束平均功率为 $P = 100 \text{ mW}$. 从图中可以看出,随着细丝向非线性介质靠近,其对应的热像也向非线性介质靠近. 细丝离非线性介质前表面越远,其对应的热像的峰均比光强越低,这主要是因为随着散射丝到非线性介质前表面的距离增加,传输扩散到主光束外部的衍射光增加,这导致产生热像增长的折射光减少. 图 7 所示为热像到非线性介质后表面的距离 d_h 随细丝到非线性介质前表面的距离 d_l 的变化图. 明显可以看出,热像到非线性介质的距离均随散射丝到非线性介质的距离的增加基本线性增加,二者离非线性介质后、前表面的距离近乎相等,即热像位于散射丝关于非线性介质对称位置处.

3.2.3. 入射光束脉冲宽度对热像的影响

图 8 所示为不同时间宽度的脉冲光束的热像峰均比光强随入射光束平均功率 P 的变化图. 从图

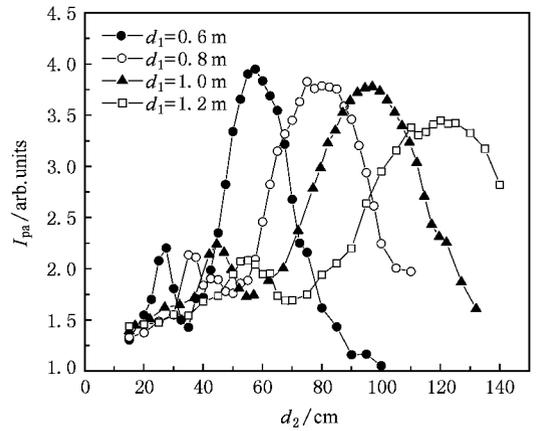


图 6 模糊斑离非线性介质前表面不同距离情况下,光束经过非线性介质后其峰均比光强随传输距离的变化

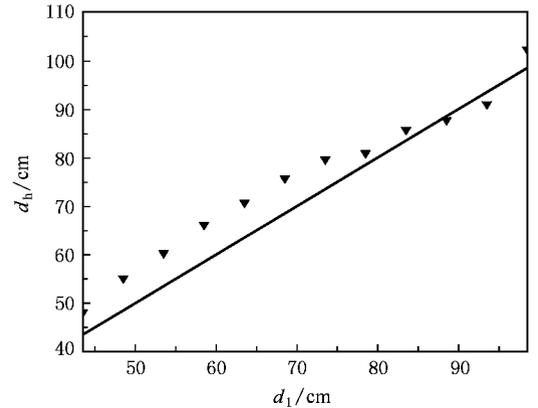


图 7 热像平面到非线性介质后表面的距离 d_h 随模糊斑平面到非线性介质前表面的距离 d_l 的变化(线表示连续单色光的理论预言结果,符号为实验结果)

中可以看出,随着入射光束平均功率的增加,热像峰均比光强逐渐增加,最后趋于饱和. 在相同入射功率情况下,脉冲越宽,热光越强,且趋于饱和的入射光束平均功率稍稍有些增加,这是由于脉宽增加引起脉冲峰值下降,因而非线性效应减弱所致. 另外 900 fs 与 1.3 ps 的数据线靠得很近,而其他线间间距较大,即 120 fs 与 600 fs 及 600 fs 与 900 fs 之间的差较 900 fs 与 1.3 ps 的小些,这是由于后者脉宽增加引起脉冲峰值下降的倍数减小所致. 在图中作水平横线,如图中所示点线所示,对应不同宽度脉冲产生相同强度热像,查点线与数据线交点对应入射光束平均功率,可以发现,平均功率与脉宽的商并不相等,而是越来越小,即脉宽越宽,产生相同强度热像所对应的峰值功率相对要小一些,也就是说,对于

一定峰值功率的脉冲,随着脉冲宽度的增加,热像增强.这主要有两个方面的原因,一方面,随脉冲宽度增加,介质非线性系数增加^[20],非线性效应增强,另一方面则是脉冲宽度增加,色散长度增加,故介质色散致脉冲展宽减弱.

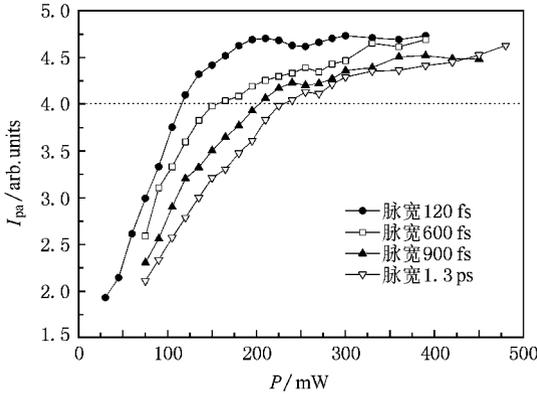


图 8 不同脉宽情况下,热像峰均比光强随入射平均功率 P 的变化图

3.2.4. 介质厚度对热像的影响

图 9 所示为入射光束经过不同厚度非线性介质后其峰均比强度沿轴变化曲线 (a) 为入射光束平均功率 $P = 100$ mW 的情况 (b) 为介质引入的 B 积分一定的情况. 其中细丝距离非线性介质 CS_2 前表面距离 $d_1 = 100$ cm, 细丝宽度 0.2 mm. 从图中可以看出,对于不同厚度的介质,热像均处在非线性介质后面与模糊斑到非线性介质前表面近似相等距离处,表明介质厚度增加对热像的位置影响不大,但随介质长度增加,由于入射平均功率一定,因而表征调制增长的 B 积分增加,热像光强增加,这与文献 15 的结果基本一致. 图 9 (b) 中 1 cm 介质的入射功率为 500 mW, 2 cm 介质的入射功率为 250 mW, 5 cm 介质的入射功率为 100 mW. 在入射光束脉冲宽度均为 120 fs 时,在不考虑色散致脉冲展宽时,通过测定光束经过介质多面反射等各种损耗约 30%, 脉冲经过非线性介质引入的 B 积分约为 2.8 rad (计算中按文献 21] 取 120 fs 时 CS_2 的非线性系数为 3.0×10^{-6} cm^2/GW 折射率为 1.6). 从图 9 (b) 中可以看出,不同长度情况下的热像的峰均比光强基本相等,表明热像光强基本由 B 积分决定,但仔细分辨可以看出,介质厚度越厚,热像的峰均比光强越弱,这亦与文献 15 的结果基本一致. 这主要是由于随介质厚度增加,色散致脉冲略有展宽,脉冲光强下降致非线性效应减弱所致,另一方面则是由于在 B 积分一定

时,介质越厚,光强越弱,调制增长的截止频率越低,形成热像的可以增长的调制范围缩小.

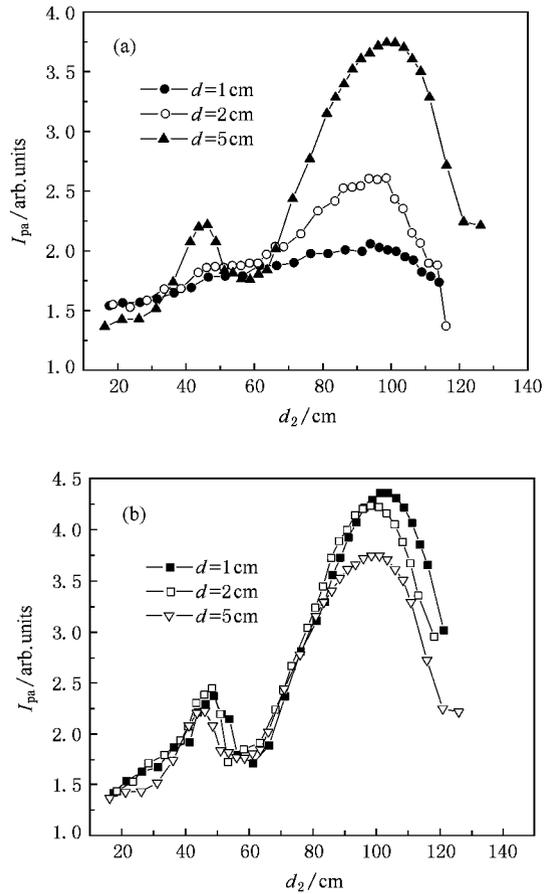


图 9 入射光束经过不同厚度非线性介质后其峰均比强度沿轴变化 (a) 入射功率一定; (b) B 积分一定

3.2.5. 模糊斑的大小对热像的影响

图 10 所示为入射功率 100 mW 时,五个不同宽度细丝情况下光束经非线性介质后其峰均比光强 (I_{pa}) 沿传输轴变化曲线,其中细丝到非线性介质前面的距离为 $d_1 = 100$ cm. 从图中可以看出,对于不同宽度的细丝,热像均形成在非线性介质后 $d_2 \approx 100$ cm 处,即位于模糊斑关于非线性介质对称的位置. 而不同宽度细丝的热像的峰均比光强则有变化,可以看出,其中 0.2 mm 细丝对应的热像最强, 0.1 mm 与 0.3 mm 的细丝的热像均比它弱,而大于 0.3 mm 的细丝的热像随细丝模糊斑尺寸的增加而减弱,表明随细丝宽度的增加,热像光强先增加,达到某最大值后,再单调减弱. 这表明,正如我们在文献 16] 中对单色平面波所预言的,对于宽频带光束,对于一定的入射功率等参数下,同样存在产生最强热像的模糊斑大小. 这主要是由于,热像本质上是

小尺度自聚焦的特殊情况,而对于宽频带光束的小尺度自聚焦,空间调制的增长也有一定的频率范围,并且也有最快增长频率^[22],不同大小的模糊斑引入的空间调制的频率范围不同,其中最能对应宽频带光束空间调制的增长频率范围的模糊斑将产生最强热像,其余的则相对会弱一些。

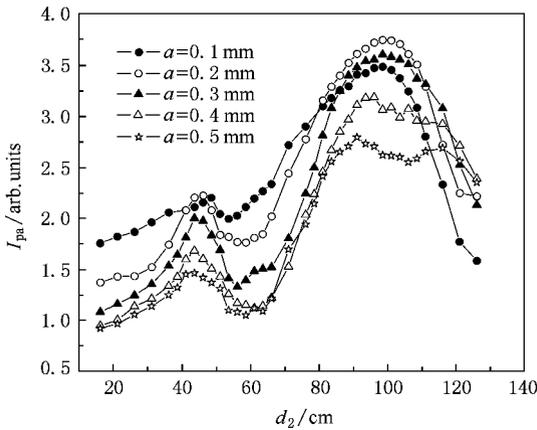


图 10 不同宽度细丝情况下,光束经非线性介质后其峰均比强度沿轴变化

4. 结 论

通过对宽频带脉冲光束经单片非线性自聚焦介质热像效应的实验研究,我们发现,对于宽频带脉冲光束,模糊斑也可以导致热像的形成,并且,热像形成在模糊斑关于非线性介质对称的共轭位置处。此外,随入射光束功率的增加,热像逐渐增强并最终达到饱和。而随着介质厚度的增加,在入射功率一定时,热像光强不断增加,而当 B 积分一定时,随着介质厚度增加,热像光强减弱。随着入射脉冲宽度的增加,若入射光束平均功率一定则热像光强单调下降,而若峰值功率相同则脉宽越宽热像越强,主要由于随脉宽增加介质非线性系数增加以及色散致脉冲展宽效应减弱。随细丝宽度的增加,热像光强先增加,达到某最大值后,再单调减弱。对于宽频带光束,同样存在产生最强热像的模糊斑尺寸。所得结果可为适当排布高强度宽频带脉冲激光系统中光学元件,及在应用中安全使用高强度激光以避免热像带来的损伤提供参考。

- [1] Hunt J T, Manes K R, Renard P A 1993 *Appl. Opt.* **32** 5973
- [2] Willams W H, Manes K R, Hunt J T, Renard P A, Milam D, Eimerl D 1996 **UCRL-LR-105821-96-1**
- [3] Widmayer C C, Milam D, deSzoek S P 1997 *Appl. Opt.* **36** 9342
- [4] Widmayer C C, Nickels M R, Milam D 1998 *Appl. Opt.* **37** 4801
- [5] Bespalov V I, Talanov V I 1966 *JETP Lett.* **3** 307
- [6] Wen S C, Fan D Y 2001 *Chin. Phys.* **10** 1032
- [7] Wen S C, Qian L J, Fan D Y 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1640 (in Chinese) [文双春、钱列加、范滇元 2003 物理学报 **52** 1640]
- [8] Yi X N, Hu W, Luo H L, Zhu J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 749 (in Chinese) [易煦农、胡巍、罗海陆、朱静 2005 物理学报 **54** 749]
- [9] Wen S C, Fan D Y 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1282 (in Chinese) [文双春、范滇元 2000 物理学报 **49** 1282]
- [10] Feng Z H, Fu X Q, Zhang L F, Xu H W, Wen S C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2253 (in Chinese) [冯则胡、傅喜泉、章礼富、徐慧文、文双春 2008 物理学报 **57** 2253]
- [11] Xie L P, Zhao J L, Su J Q, Jing F, Wang W Y, Peng H S 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2175 (in Chinese) [谢良平、赵建林、栗敬钦、景峰、王文义、彭翰生 2004 物理学报 **53** 2175]
- [12] L Xie, J Zhao, F Jing 2005 *Appl. Opt.* **44** 2553
- [13] Peng T, Zhao J L, Xie L P, Ye Z J, Li Q, Su J Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3255 (in Chinese) [彭涛、赵建林、谢良平、叶知隽、李强、栗敬钦 2007 物理学报 **56** 3255]
- [14] Wang Y W, Hu Y H, Wen S C, You K M, Fu X Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5855 (in Chinese) [王友文、胡勇华、文双春、游开明、傅喜泉 2007 物理学报 **56** 5855]
- [15] Wang Y W, Wen S C, Hu Y H, Zhang L F, Fu X Q 2008 *Chin. J. Lasers* **35** 698 (in Chinese) [王友文、文双春、胡勇华、章礼富、傅喜泉 2008 中国激光 **35** 698]
- [16] Wang Y W, Wen S C, Zhang L F, Hu Y H, Fan D Y 2008 *Appl. Opt.* **47** 1152
- [17] Fan D Y, Zhang X M, Fu X Q, Qian L J 2005 *Proc. SPIE* **5627** 64
- [18] Pennington D M, Britten J A, Miller J L 1996 **UCRL-LR-105821-97-4** 230
- [19] Strickland D, Mourou G A 1985 *Opt. Comm.* **56** 219
- [20] Brabec T, Krausz F 2000 *Rev. Mod. Phys.* **72** 545
- [21] Ganeev R A, Ryasnyansky A I, Baba M, Suzuki M, Ishizawa N, Turu M, Sakakibara S, H Kuroda 2004 *Appl. Phys. B* **78** 433
- [22] Liou L W, Cao X D, Mckinstrie C J, Agrawal G P 1992 *Phys. Rev. A* **46** 4202

Experimental study of the nonlinear hot image effect of broadband pulsed laser beams^{*}

Wang You-Wen^{1,2)} Deng Jian-Qin¹⁾ Wen Shuang-Chun^{1)†} Tang Zhi-Xiang¹⁾ Fu Xi-Quan¹⁾ Fan Dian-Yuan¹⁾

¹ *Key Laboratory of Micro/Nano Optoelectronic Devices of Ministry of Education, School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha 410082, China*

² *Department of Physics and Electronic Information Science, Hengyang Normal University, Hengyang 421008, China*

(Received 24 June 2008 ; revised manuscript received 4 August 2008)

Abstract

The experimental investigation of the nonlinear hot image effect in brand-band pulsed laser beams is reported, placing emphasis on the observation of the formation of hot images and the influence of incident average power of pulse, pulse width, and thickness of the nonlinear medium on the location and intensity of hot images. It is shown that, hot images can be formed from obscurations in the broadband laser beam through a nonlinear Kerr medium slab, as in the case of the monochromatic continuous light beam, and are located in the plane symmetrical to the obscuration with respect to the nonlinear slab. In addition, with the incident average power of pulse increasing, the intensity of hot image increases and ultimately reaches saturation, while with the pulse width increasing, the intensity of hot image decreases for a pulse of given energy. On the contrary, it increases for a pulse of given peak power.

Keywords : high-power lasers, hot image, broadband pulsed laser beam, small-scale self-focusing

PACC : 4265J, 4260, 4260K

^{*} Project supported by the Joint Foundation of the National Natural Science Foundation Committee of China and China Academy of Engineering Physics (Grant No. 10576012), the National High Technology Research Development Program for Inertial Confinement Fusion of China, and Provincial Natural Science Foundation of Hunan (Grant No. 08jj3001).

[†] Corresponding author. E-mail: scwen@vip.sina.com