

文章编号:1004-4213(2011)02-0267-5

非线性介质中会聚高功率激光的焦点位置控制*

刘辉,傅喜泉,侯彦超

(湖南大学 信息科学与工程学院 微纳光电器件及应用教育部重点实验室,长沙 410082)

摘 要:为了控制激光束的传输,使激光光束能根据实际情况在特定的位置聚焦,并且保证在传输过程中光束质量不退化,根据透镜聚焦和非线性介质的自聚焦理论,研究了高功率会聚激光光束在两者共同作用下焦点位置的变化.分析了各种因素对高功率激光光束的焦点位置的影响,并通过数值求解光束在非线性 Kerr 介质中所遵循的非线性薛定谔方程,得到焦点的位置变化和光束初始束宽,输入功率以及透镜焦距的关系,从而找到了控制焦点位置的方法.基于非线性薛定谔方程,对理论分析进行了相应的模拟验证,结果相互吻合.

关键词:高功率激光;非线性传输;自聚焦;光束束宽;聚焦长度

中图分类号:O437

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114002.0267

0 引言

激光束传输技术已经有了很好的应用,如激光刻录,就是利用激光束传输控制焦点在待刻录的位置,完成内部任意位置的刻录.激光熔切同样也是控制激光束聚焦点落在熔切点处,利用焦点处的高功率和小光斑实现熔切.近年来,利用激光束传输技术来研究空间太阳能的开发更是受到了广泛关注.2009年6月,美国利弗莫尔实验室、俄罗斯科学院西北利亚分院和英国阿斯顿大学的研究人员报道了利用激光束技术传输空间太阳能技术的发展^[1].研究证明,空间自聚焦适当地压缩了激光束并没有引起光束质量下降.大气密度变化抑制成丝过程,并且使得高质量激光束的非线性透镜辅助传输到地面小光斑成为可能,大大地降低了地面接收装置的尺寸.

实现这些应用最关键的就是控制激光束的传输,使得激光光束能根据实际情况在特定的位置聚焦,并且保证在传输过程中光束质量不退化.这就涉及到非线性光学中最基本的一个物理现象——自聚焦^[2-5],由于是高功率光束的自聚焦过程,其焦点位置并不易控制,因此有必要引入聚焦透镜来增强对焦点位置的控制.

本文基于透镜聚焦和非线性介质中的自聚焦理论,分析了各种因素对高功率激光光束的焦点位置

的影响.并通过数值求解光束在非线性 Kerr 介质中所遵循的非线性薛定谔方程,从而揭示了入射光束功率,光束初始束宽以及透镜焦距对光束演化过程中焦点位置的影响.本文的研究结果使工作人员可以将光束的聚焦点控制在任何他们期待的位置,对激光传输技术的应用发展有一定帮助.

1 理论分析

为了更好的理解激光光束的自聚焦问题,忽略色散项、高阶非线性项及损耗,仅考虑对光束演变影响最关键的效应(衍射效应和非线性 Kerr 效应).在慢变傍轴近似下,采用最基本的归一化非线性薛定谔传输方程^[6]

$$i \frac{\partial a}{\partial \xi} + \frac{L}{4Z_{\text{diff}}} \Delta_{\perp} a + \frac{L}{Z_{\text{nl}}} |a|^2 a = 0 \quad (1)$$

取 $\xi = z/L$, $u = x/w_0$, $v = y/w_0$, $a = A/\sqrt{I_0}$ 进行归一化.其中 L 是传输介质的长度, w_0 指的是光束初始束宽, I_0 是指初始的峰值光强.式(1)中的第 2 项表示衍射项, Z_{diff} 为衍射长度

$$Z_{\text{diff}} = k_0 \omega_0^2 / 2 \quad (2)$$

Z_{diff} 是表征衍射强弱的特征长度, Z_{diff} 越大衍射作用越强. $k_0 = 2\pi n_0 / \lambda_0$ 表示波矢, λ_0 光束的中心工作波长, n_0 表示线性的折射率系数.式(1)中的第 3 项表示的是非线性项. Z_{nl} 为非线性长度

基金项目: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(No. 10776008)、高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20070532075)和湖南省科学技术厅科技计划(No. 2009FJ3112)资助

第一作者:刘辉(1985—),男,硕士研究生,主要研究方向为宽带脉冲激光的传输和控制. Email:huntmans@163.com

导 师:傅喜泉(1977—),男,教授,主要研究方向为宽带脉冲激光的传输和控制. Email:fuxiquan@gmail.com

收稿日期:2010-08-09; **修回日期:**2010-09-25

$$Z_{nl} = 1/\gamma I_0 = n_0/k_0 n_2 I_0 \quad (3)$$

Z_{nl} 表征非线性强弱的特征长度, 其值越小非线性越强; n_2 表示非线性折射率系数; $\gamma = k_0 n_2/n_0$ 为非线性系数。

入射功率 P , 衍射长度 Z_{diff} 和非线性长度 Z_{nl} , 这三个量对光束的自聚焦作用有决定性的影响. 只有当入射功率超过临界功率 P_{cr} 时

$$P_{cr} \equiv 3.72\lambda_0^2/8\pi n_0 n_2 \quad (4)$$

激光光束才能克服衍射而发生自聚焦, 并最终在有限的距离 Z_{SF} 处^[7-9]

$$Z_{SF} = \frac{0.367Z_{diff}}{\sqrt{[(P/P_{cr})^{1/2} - 0.852]^2 - 0.0219}} \quad (5)$$

崩塌于一个奇点(自聚焦点). Z_{SF} 为自聚焦长度, 不过当 $Z_{diff} \gg Z_{nl}$ 时, 也就是衍射作用在传输过程中完全占主导地位, 它被修正为 $Z_{SF} \approx \sqrt{Z_{diff} Z_{nl}/2}$. 本文要讨论的是衍射项, 非线性项和透镜聚焦都对传输过程都有相当影响的情况. 为了进一步加强激光光束的控制, 在光束入射前, 加入一个理想的薄聚焦透镜, 透镜焦距为 F , 光束焦点的位置将会提前, 则从原来的 Z_{SF} 向前移动至 Z_{SFF} ^[10-11]

$$1/Z_{SFF} = 1/Z_{SF} + 1/F \quad (6)$$

研究中最关心的就是自聚焦和透镜聚焦共同作用下聚焦长度 Z_{SFF} 的大小, 将式(2)和式(5)代入式(6)整理得

$$Z_{SFF} = \frac{0.1835k_0\omega_0^2 F}{0.1835k_0\omega_0^2 + F \sqrt{[(P/P_{cr})^{1/2} - 0.852]^2 - 0.0219}} \quad (7)$$

从式(7)分析, 要达到对光束焦点位置控制, 就是要控制好入射功率 P , 光束初始束宽 ω_0 , 以及透镜焦距 F 三者之间的关系.

1) 考虑入射功率 P 对焦点位置的影响. 确定光束初始束宽 ω_0 和透镜焦距 F 一定, 根据式(7), 很容易得到 $Z_{SFF} \propto 1/\sqrt{P}$, 即焦点位置随着入射功率的增大, 而向前移动. 高功率能够促使光束发生聚焦.

2) 考虑初始束宽 ω_0 对焦点位置的影响. 当入射功率和透镜焦距一定时, 可以得到它们之间的关系, $Z_{SFF} \propto \omega_0^2$, 即两者共同作用下, 聚焦长度随初始束宽成二次方增长. 焦点位置随着初始束宽的变化较大.

3) 考虑透镜焦距 F 对焦点位置的影响. 同理, 确定入射功率 P 和光束初始束宽 ω_0 不变时, $Z_{SFF} \propto F$, 即自聚焦作用一定的情况下, 焦点位置主要由透镜焦距决定. 使用长焦透镜, 焦点后移; 使用短焦透镜, 焦点前移.

4) 焦点位置的控制. 上述分析中, 已经得到了焦点位置与入射功率 P , 光束初始束宽 ω_0 以及透镜焦距 F 的关系. 对于初始束宽一定的会聚光束, 如

果要使它不同的入射功率下却能在始终在同一位置聚焦, 那么透镜焦距和入射功率需满足 $F \propto \sqrt{P}$, 即入射功率增加时要保持焦点位置不变, 增大透镜焦距. 这是因为入射功率增大, 焦点前移, 透镜焦距增大, 焦点后移. 当两者相互平衡时, 就能保证焦点始终在所期待的位置了. 因此, 对焦点位置的控制归根结底是要实现入射功率和透镜焦距大小关系的匹配.

2 验证分析

为进一步验证上述的理论分析结果, 从非线性方程(1)出发, 对自聚焦和透镜聚焦共同作用下相应的聚焦过程进行数值模拟. 用高斯光束作为初始光场, 高斯光束透过聚焦透镜后, 其光场变为会聚的高斯光束

$$A(z=0, r) = \sqrt{\frac{2P}{\pi\omega_0^2}} \exp\left[-\frac{(1+iC_0)}{\omega_0^2} r^2\right] \quad (8)$$

式中, $C_0 = k_0\omega_0^2/2F$ 表示由引入透镜而产生的一个相位啁啾^[12]. 根据上述的理论分析, 下文将具体模拟入射功率, 光束初始束宽, 透镜焦距对聚焦的焦点位置变化影响, 以及如何控制焦点位置. 本文采用玻璃作为非线性传输介质, 其线性折射率和非线性折射率分别为: $n = 1.55 \text{ cm}^2 \cdot \text{GW}^{-1}$, $n_2 = 2.7 \times 10^{-7} \text{ cm}^2 \cdot \text{GW}^{-1}$; 光束工作波长为 $\lambda_0 = 0.8 \mu\text{m}$. 由式(4)得到临界功率 $P_{cr} = 2.267 \text{ kW}$.

2.1 入射功率对焦点位置的影响

在忽略损耗和增益的情况下, 光束功率在非线性传输过程中始终保持不变, 但是由于光束聚焦或散焦, 导致光斑大小变化, 从而使得式(1)中的衍射项和非线性项都发生变化. 最终影响到光束的整个聚焦过程. 考虑不同的入射功率下, 光束焦点位置的变化. 当入射光束的初始束宽一定时, 从式(5)中可以得到自聚焦长度 Z_{SF} 随入射功率增大而减少, 并且透镜焦距 F 也不发生变化的情况下, 根据式(6)得到在透镜聚焦和自聚焦共同作用下, 聚焦长度 Z_{SFF} 随入射功率增大而减小. 取透镜焦距 $F = 3 \text{ m}$, 初始束宽 $\omega_0 = 0.5 \text{ cm}$, 得到焦点位置随入射功率变化如图 1.

图 1 中的插图为入射功率较小时的情况. 由图 1 可知, 当入射功率较小, 特别是接近临界功率时, 如入射功率从 1 倍临界功率到 10 倍临界功率变化时, Z_{SFF} 值接近透镜焦距 $F = 3 \text{ m}$, 如 $P/P_{cr} = 1$ 时, 则 $Z_{SFF} = 2.96 \text{ m}$. 这表明当光束的入射功率很小时, 光束的聚焦主要由透镜决定. 这是因为当入射功率接近临界功率时, 自聚焦长度 Z_{SF} 接近无穷大, 式(6)中 $1/Z_{SF}$ 几乎可以忽略不计, 所以 Z_{SFF} 与透镜焦距 F

相当,即可忽略自聚焦作用,光束聚焦主要受透镜的影响.但是随着入射功率的不断增大,聚焦长度也不断减少,受透镜焦距和自聚焦共同作用明显.从图中可以发现数值模拟结果和理论分析结果吻合,可是当入射功率增大到一定程度时,如 900 倍临界功率时,开始出现一定的误差,这是由于非线性长度随入射功率增大而减少,当它减少到满足 $Z_{diff} \gg Z_{nl}$ 时,现有的理论分析结果要做出一定的修正.

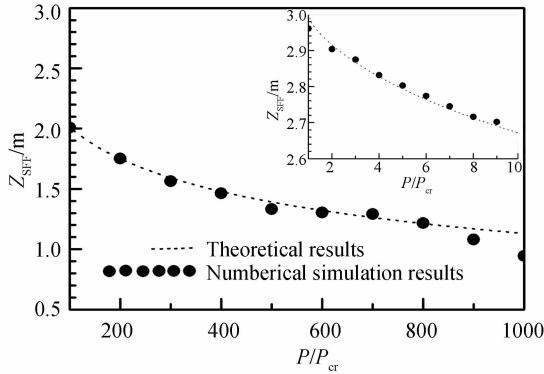


图 1 焦距随入射功率的变化
Fig. 1 Dependence of the focusing length on input power

2.2 光束初始束宽对焦点位置的影响

衍射作用对光束的自聚焦有重要的影响,而衍射的强弱直接由光斑大小决定.为了更好地分析光斑大小对聚焦作用的影响,先确定其它两个影响因素不变,入射功率为 100 的临界功率,透镜焦距为 3 m. 改变光束初始束宽的大小(始终保证光束的束宽小于透镜的半径),观察激光光束自聚集过程中焦点位置的变化.如图 2 所示,聚焦长度随着光束束宽的增大而增大,实际上是成平方增长.这是因为衍射长度与束宽的平方成正比,当束宽增大时,衍射作用增强,减弱了光束的自聚集,焦点后移.由图 2 可以发现,当束宽较小时,理论和数值模拟吻合的很好,但是随着初始束宽进一步增大,数值模拟与理论值的偏差会变大.这主要有两个原因,一是由于数值模拟时,采样点数始终是一定的,那么随着束宽增大,采

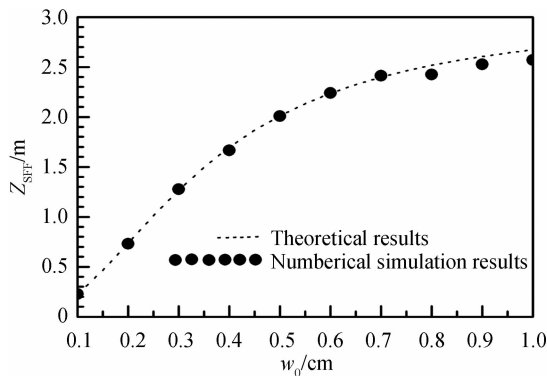


图 2 焦距随光束初始束宽的变化
Fig. 2 Dependence of the focusing length on beam waist

样间距增大,就造成了更大的计算误差;二是初始束宽不断变大,衍射长度越大,使其满足 $Z_{diff} \gg Z_{nl}$,所以现有的理论分析结果本身存在一定的误差.

对比图 1 和图 2 可以发现,两者对焦点位置的影响是刚好相反的.这是因为实际上光强 I 才是能对光束传输起直接影响的,不管是入射功率,还是光束初始束宽都是通过改变光强来对焦点位置起影响,而光强为功率和面积之比,可以通过减小入射功率或增加初始束宽对光强变化起到相同的效果,从而对焦点位置的影响作用相同.如图 1 中入射功率很小时,光束的聚焦位置接近透镜焦距 3 m,图 2 中初始束宽增大到一定程度时,光束的聚焦位置也接近透镜焦距 3 m. 减小入射功率使非线性减弱,增大光束束宽使衍射作用加强,两者达到了共同的效果——衍射在传输中占主导地位,自然这时候光束的聚焦取决于聚焦透镜.

2.3 透镜焦距对焦点位置的影响

通过对光束的入射功率以及光束初始束宽的控制,实际上是通过初始的光强达到对其自聚焦过程的控制.当然,根据式(6),可以引入聚焦透镜,对光束进行进一步的控制.大多研究只是定性的描述了聚焦透镜可以使光束聚焦加剧,但是如何控制其加剧的程度,也就是如何控制透镜焦距和光束特征参量的数量关系讨论较少.为了单独考虑透镜焦距的影响,首先使光束初始束宽和光束的入射功率一定.确定入射功率为 100 倍临界功率,初始束宽为 0.3 cm,保证了它不满足 $Z_{diff} \gg Z_{nl}$ 的条件.图 3 是此时的理论结果和数值模拟的结果,可以发现两者吻合,在透镜聚焦和自聚焦共同作用下,光束的聚焦长度随透镜焦距增加而增加.入射功率和初始束宽一定也就是意味着自聚焦过程不变,即自聚焦长度 Z_{SF} 不变,所以由式(6)得到 Z_{SF} 大小只受透镜焦距影响.

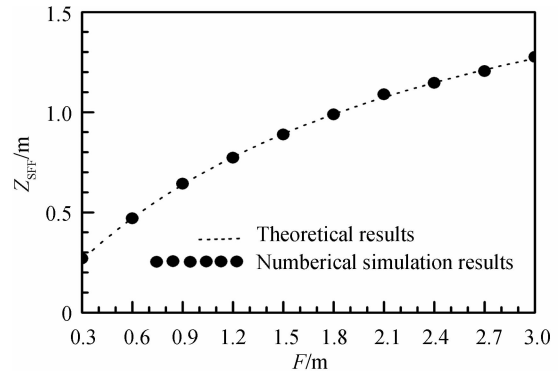


图 3 透镜聚焦和自聚焦共同作用下焦距大小与透镜焦距的关系

Fig. 3 Dependence of the focusing length on focal length of lens

在透镜焦距很小时,透镜焦距远小于光束自聚焦长度时,光束的聚焦长度主要受透镜焦距的影响,这同上述的分析也是一致的;当透镜焦距不断增大时,两者作用都很重要;再进一步增大,直到满足自聚焦长度远小于透镜焦距时,光束的焦点位置就主要受自聚焦的影响,一种极限就是透镜焦距增大到无穷(为一个理想平面镜),透镜对光束的焦点位置就毫无影响了。

2.4 焦点位置的控制

通过上述的分析,本文得到光束聚焦位置受入射功率、初始束宽和透镜焦距的影响.当入射功率增大时,聚焦作用增强,焦点向前移动;束宽增大时,衍射作用变强,减弱光束的聚焦,焦点向后移动;透镜焦距增大,聚焦减弱,焦点后移.所以当要控制光束时,就可以通过它们之间的相互影响.在光束初始束宽为 0.3 cm 时,要控制光束聚焦的位置始终在 0.5 m 处,在图 4 中,体现了入射功率和透镜焦距必须满足的大小匹配关系.当入射功率不断增加时,透镜的焦距也随其不断增加,这是因为入射功率增大,从式(5)和(6)中分析,自聚焦长度 Z_{SF} 减小,这时要保证两者共同作用下的焦距 Z_{SF} 不变,只有通过增大透镜焦距 F .实际上就是入射功率增大时,光束聚焦增加.所以要通过增大透镜焦距减弱光束聚焦,当减弱作用和增强作用平衡时,就实现了对焦点位置的控制.从图 4 中也很容易发现,理论结果和数值模拟结果非常的一致.图 5 为三种不同情况下,空间最大强度 I_{max} 的变化,第一个波峰即是焦点的位置.图中可以看出虽然它们的入射功率和透镜焦距都不相同,但是都在 0.5 m 处聚焦,波峰的值则由入射功率和透镜焦距共同作用的,入射功率越大或透镜焦距越小,峰值越大.由此,可以通过匹配光束本身和透镜,使得会聚高功率激光光束在任意位置聚焦.

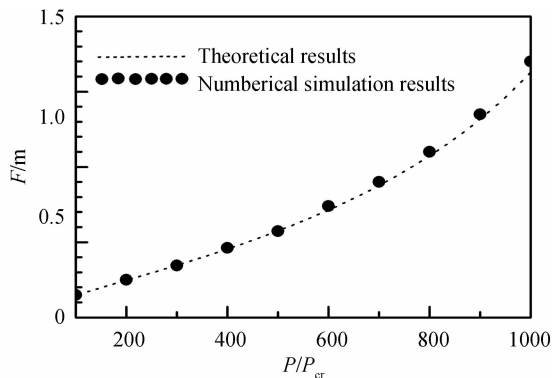


图 4 入射功率和透镜焦距满足的关系

Fig. 4 Dependence of the focusing length of lens on input power

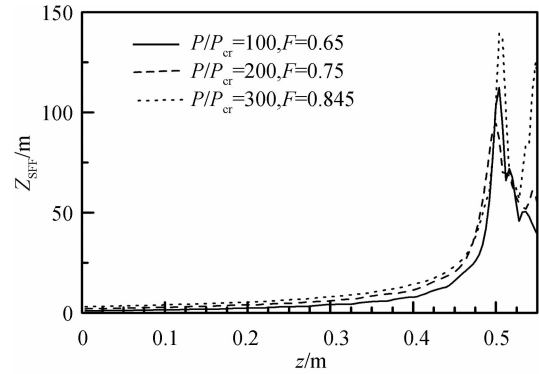


图 5 三种不同的入射功率和透镜焦距下,空间最大强度随传输距离的变化

Fig. 5 Dependence of the maximum intensity on propagation distance at different values of P/P_{cr} and F

根据上述分析的结果,在利用太阳能过程中,空间太阳能以激光的形式透过聚焦透镜向地面传输,可以通过改变激光光束的初始功率,光束的初始束宽(透镜半径),以及透镜焦距,将光束的焦点位置控制在地面的接受装置上.由于焦点处光斑很小且功率很高,这样就可以采用很小的接受装置吸收很高功率的太阳能,大大提高太阳能的吸收效率.

3 结论

本文在综合考虑衍射、自聚焦和透镜聚焦三个过程同时作用下,高功率激光光束的聚焦过程.理论研究了焦点位置与光束初始束宽、入射功率和透镜焦距之间的关系,通过数值模拟分析,进一步验证了理论分析.聚焦长度随入射功率增大而减少,随光束初始束宽增大而增大,随透镜焦距增大而增大.所以利用这三个要素对聚焦的影响,可以控制它们之间的关系,使整个光束在期望的位置聚焦而不发生分裂,在焦点处获得一个极高的功率和极小的光斑.这些研究不仅在高功率激光传输理论与技术的发展,还是在高功率激光的应用,如空间太阳能的利用等方面,都具有一定的参考价值.

参考文献

- [1] RUBENCHIK A M, FEDORUK M P, TURITSYN S K. Laser beam self-focusing in the atmosphere[J]. *Physical Review Letters*, 2009, **102**(23): 3902-3905.
- [2] MORANDOTTI R, EISENBERG H S, SILBERBERG Y, et al. Self-focusing and defocusing in waveguide arrays[J]. *Physical Review Letters*, 2001, **86**(15): 3296-3299.
- [3] ALEXEEV I, ANTONSEN T M, KIM K Y, et al. Self-focusing of intense laser pulses in a clustered gas[J]. *Physical Review Letters*, 2003, **90**(10): 3402-3405.
- [4] WEN Shuang-chun, FAN Dian-yuan. Small-scale self-focusing of nonparaxial laser beams[J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, **49**(3): 460-462.

文双春,范滇元.非傍轴光束的小尺度自聚焦研究[J].物理学报,2000,**49**(3):460-462.

- [5] ZHENG Yi-zhou, HU Wei, LU Da-quan, *et al.* A non-paraxial correction to the small-scale self-focusing theory [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(11): 1329-1331.
郑一周, 胡巍, 陆大全, 等. 小尺度自聚焦理论的非傍轴修正 [J]. *光子学报*, 2003, **32**(11): 1329-1331.
- [6] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics[M]. 2nd. San Diego: Academic Press, 1995: 26-36.
- [7] DAWES E L, MARBURGER J H. Computer studies in self-focusing[J]. *Physical Review*, 1969, **179**(3): 862-868.
- [8] MARBURGER J H, DAWES E. Dynamical formation of a small-scale filament[J]. *Physical Review Letters*, 1968, **21**(8): 556-558.
- [9] MARBURGER J H. Self-focusing: theory [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 1975, **4**: 35-110.
- [10] BERGE L, SKUPIN S, NUTER R, *et al.* Ultrashort filaments of light in weakly ionized, optically transparent media [J]. *Reports Progress in Physics*, 2007, **70**(10): 1633-1713.
- [11] COUAIRON A, MYSYROWICZ A. Femtosecond filamentation in transparent media [J]. *Physics Reports*, 2007, **441**(2-4): 47-189.
- [12] LANG Xian-li, LIU De-sen, ZHU Shao-li, *et al.* Imaging and Fourier transform properties of grin-rod lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(7): 988-992.
郎贤礼, 刘德森, 朱少丽, 等. 自聚焦透镜的傅里叶变换性质及成像性质 [J]. *光子学报*, 2005, **34**(7): 988-992.

Control of High-power Laser Focal Position in Nonlinear Media

LIU Hui, FU Xi-quan, HOU Yan-chao

(Key Laboratory for Micro/Nano Optoelectronic Devices (Ministry of Education),
School of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to control the propagation of high power laser beam and make the laser beam focus at any position without quality degradation, the change of high-power laser focal positions was investigated. The proposed research was based on the theory of lens-focusing and laser self-focusing in nonlinear media. Influences of different kinds of factors on the focal position were analyzed. Through numerical solution of the nonlinear Schrödinger equation, the relationships of the focal position with input power, initial waist and focal length of lens were obtained, and thus the method to control the beam focal position was found. The numerical simulations coincide with the theoretical analysis.

Key words: High-power laser; Nonlinear propagation; Self-focusing; Beam waist; Focusing length