

片状放大器中片间空气间隔对小尺度自聚焦的影响*

朱 静 胡 巍 易煦农 罗海陆

(华南师范大学传输光学实验室, 广州 510631)

摘 要 从非线性 Schrödinger 方程出发, 根据线性的近似分析方法, 通过把介质片厚度和片间空气间隔转化为线性与非线性传输距离比讨论了系统 B 积分值和空气间隔对非线性增益谱的影响. 着重分析了激光介质片数以及 B 积分值和非线性增长率之间的关系, 并讨论了增长率随 B 积分值与片数的变化规律. 其他参量不变的情况下, 片间空气间隔的增大, 使增益谱向长波方向移动, 而介质片数则对增益谱的最高增益和谱线位置都有影响. 同时, 对这一现象做了无空气间隔的等效模拟.

关键词 小尺度自聚焦; 空气间隔; 调制增益谱; B 积分

中图分类号 TN248; O437 **文献标识码** A

0 引言

非线性小尺度自聚焦是限制高功率固体激光驱动器输出能量和系统效率的重要因素之一^[1], 也是惯性约束聚变激光器中的重要物理问题. 它往往导致光束发生分裂成丝等现象, 致使光束局部的光强急剧增加而损伤光学元件. 处理这一问题的物理模型主要有两个: 基于非线性 Schrödinger 方程的数值模拟方法, 和基于 Bessel-Talanov 理论的 B 积分理论. 而将两种物理模型结合起来^[2], 对实际的传输问题来说是非常重要的.

关于小尺度自聚焦的危害和防范的研究始于 70 年代初, Bessel 和 Talanov 假定了横截面上平均光强是常量, 且在传输过程中不随距离变化. 在此基础上得到了小尺度扰动的最快增长频率、最大增长系数 B 等著名结果^[3]. 国内关于小尺度自聚焦的研究也进行了多年, 文双春等人在考虑介质的增益或损耗的情况下从 Bessel 方程出发对传输特性进行了研究^[4], 是一种较新颖的方法. 朱启华等人采用具有负折射率系数的非线性介质来补偿非线性效应^[5], 从而达到抑制小尺度自聚焦的目的, 也得到了一些很好的结果.

本文从非线性 Schrödinger 方程(NLSE)出发, 研究片状高功率激光放大器中, 片间空气间隔对非线性增长率的影响. 从理论上给出了调制增长率的表达式, 并讨论了增长率随 B 积分值与放大器片数的变化规律.

1 光场调制的理论模型

考虑激光场 $E = E(x, y, z) \exp [i(kz - \omega t)]$, 在非线性质中的传输^[6]满足 NLSE

$$\frac{\partial}{\partial z} E = \frac{i}{2n_0 k_0} \nabla_{\perp}^2 E + ik_0 n_2 |E|^2 E \quad (1)$$

式中, 总折射率 $n(E) = n_0 + n_2 |E|^2$, I 是光功率密度, E 是光场的复振幅包络, k_0 是真空中传播常量. NLSE 具有平庸波解 $E = E_0 e^{iB}$, 在这里 $B = k_0 n_2 I z$, 即为系统的 B 积分, 是高功率激光器设计的关键参量之一^[7,8]. 由线性稳定性分析^[3,7], 可假设在初始的平面波中加一个微扰量 $|\sum_{k_{\perp}} a_{k_{\perp}}(z) \cos(k_{\perp} \cdot r)| \ll 1$. 线性化后, 考虑具有特定空间频率 $k_{\perp} \neq 0$ 的一个模, 如 $a = u + iv$, 根据光传输矩阵理论^[9,10], 则有

$$a = \begin{bmatrix} u(z) \\ v(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\Theta S) & \frac{1}{S} \sinh(\Theta S) \\ S \sinh(\Theta S) & \cosh(\Theta S) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u(0) \\ v(0) \end{bmatrix} \equiv P \begin{bmatrix} u(0) \\ v(0) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 $\Theta = \frac{k_{\perp}^2 z}{2k}$, $S^2 = \frac{\omega_c^2}{k_{\perp}^2} - 1$, $\omega_c = 2k_0 (n_0 n_2 I_0)^{1/2}$ 是截止频率.

同理, 空气间隔中的传输可表示为

$$a = \begin{bmatrix} u(z) \\ v(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Theta & \sin \Theta \\ -\sin \Theta & \cos \Theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(0) \\ v(0) \end{bmatrix} = L \begin{bmatrix} u(0) \\ v(0) \end{bmatrix} \quad (3)$$

所以传输矩阵总可以化简为线性与非线性传输矩阵交叉连乘的形式

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} = \prod_j P_j L_j \quad (4)$$

*国家自然科学基金(No. 60278013)、教育部霍英东教育基金(No. 81058)和国家高技术研究发展计划资助项目
Tel: 020-85211920-1 Email: harshing@vip.163.com
收稿日期: 2004-12-07

此处, j 为片状放大器的介质片数. 注意到 $a = u + iv$, 且 u, v 均为小量时, 有近似关系 $E_0(1 + u + iv) \approx E_0(1 + u)e^{iv}$, 故 a 的实部和虚部分别代表强度噪声和相位噪声, 而 $G_{uU} = m_{12}^2, G_{vV} = m_{22}^2, G_{vP} = m_{12}^2 + m_{22}^2$ 代表了相位和强度噪声引起的平均功率的增长率.

以神光 III 装置为例, 其厚度为 4 cm 的介质片是

$$M = \left[\begin{array}{cc} \cos \Theta_v & \sin \Theta_v \\ -\sin \Theta_v & \cos \Theta_v \end{array} \right] \left[\begin{array}{cc} 1 & 0 \\ 2B/N & 1 \end{array} \right]^N = \frac{1}{\sin \varphi} \left[\begin{array}{cc} (\cos \Theta_v + 2 \frac{B}{N} \sin \Theta_v) \sin N\varphi - \sin(N-1)\varphi & \sin \Theta_v \sin N\varphi \\ -(\sin \Theta_v - 2 \frac{B}{N} \cos \Theta_v) \sin N\varphi & \cos \Theta_v \sin N\varphi - \sin(N-1)\varphi \end{array} \right] \quad (5)$$

式中 $\cos \varphi = \cos \Theta_v + (B/N) \sin \Theta_v, \Theta_v = \frac{k_{\perp}^2 z_v}{2k}$. 由式(4), 即可得到增长率 G_{uU}, G_{vV} 和 G_{vP} .

以布儒斯特角连续倾斜放置的. 作为近似, 考虑 N 片厚度为 d 的玻璃片均匀放置, 片间间隔均为 z_v 的情况. 忽略强度增益时每个介质片的 B 积分值都相等, 为 B/N . 一般来说 $B/N \ll 1$, 则非线性矩阵中 $m_{11} \approx m_{22} \approx 1, m_{12} \approx 0, m_{21} \approx 2B/N$. 故含空气间隔的介质片数为 N 的传输矩阵可写为

$$P = \left[\begin{array}{cc} \cosh(2\Omega \sqrt{1-\Omega^2} B) & \frac{\Omega}{\sqrt{1-\Omega^2}} \sinh(2\Omega \sqrt{1-\Omega^2} B) \\ \frac{\sqrt{1-\Omega^2}}{\Omega} \sinh(2\Omega \sqrt{1-\Omega^2} B) & \cosh(2\Omega \sqrt{1-\Omega^2} B) \end{array} \right] \quad (6)$$

同理线性传输矩阵也相应地变为

$$L = \left[\begin{array}{cc} \cos(2\Omega^2 B_v) & \sin(2\Omega^2 B_v) \\ -\sin(2\Omega^2 B_v) & \cos(2\Omega^2 B_v) \end{array} \right] \quad (7)$$

式中 $B_v = k_0 n_2 I_0 z_v$, 与非线性介质中 B 积分的形式相似, 把 B_v 看作是线性介质中的等效 B 积分. 令 B_v 与 B 的比值 $V = B_v/B = z_v/d$, 则控制线性与非线性介质中的传输距离, 即 z_v 与 d 的比值 V , 就可以达到控制非线性增益谱的目的.

2 增益谱分布

2.1 考虑空气间隔时的非线性增益谱

如前推导, 对非线性增益谱模拟见图 1. 取 $\lambda = 1.053 \mu\text{m}, n_0 = 1.50, d = 4 \text{ cm}, n_2 = 2.0 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}, I_0 = 5 \times 10^9 \text{ W}/\text{cm}^2$, 截止频率为 $\omega_c = 2.33 \text{ mm}^{-1}$, $z_v = 30 \text{ cm}, B = 2, N = 10$.

由图 1 分析可知, G_{vV} 和 G_{vP} 沿长波方向都会逐渐趋近于 1, 而 G_{uU} 则是在 10 mm 波长附近迅速减小至零. 这里非线性增益谱的位置、大小, 主要取决于片间空气间隔 z_v 和 B 积分值, 而与平均功率无关. 对于片状放大器, 关心的是最低频的增益峰和增益零点, 即图 1 中的 A 和 B 位置. 在最低频峰位置附近, 随波长变化快速产生高增益, 光束局部非常不稳定, 形成了一根根强度非常高的细丝, 达到一定阈值时会导致非线性介质的局部破坏.

把 Θ_v 和 φ 代入非线性传输矩阵 P , 再以截止频率来做归一化, 令 $\Omega = k_{\perp}/\omega_c$, 则有

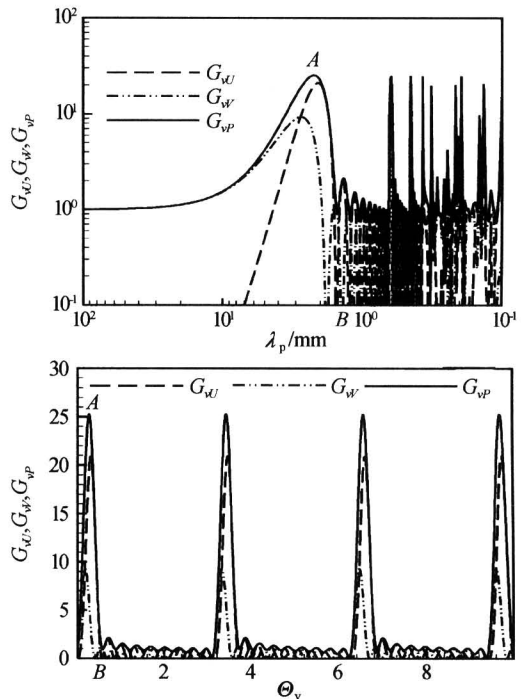


图 1 片状放大器中非线性传输的增益谱(右图为归一化之后的增益谱)

Fig. 1 Gain spectrum of nonlinear propagation, and the right one is the normalized spectrum

2.2 传输距离比和介质片数对增益分布的影响

如前推导, 可模拟传输距离比值 V 和放大器片数 N 对增益谱的影响, 见图 2、图 3 和图 4. 由图 2

可知,相对于放大器片数 N ,传输距离比值 V 对 G_{w} 的极值点位置有更大的影响. N 一定时,随着 V 的增大,曲线向长波方向移动较显著,但其极大值基本不变. 而当 V 一定时,曲线随 N 的增大也向长波方向稍稍移动,且其极大值也略微变大.

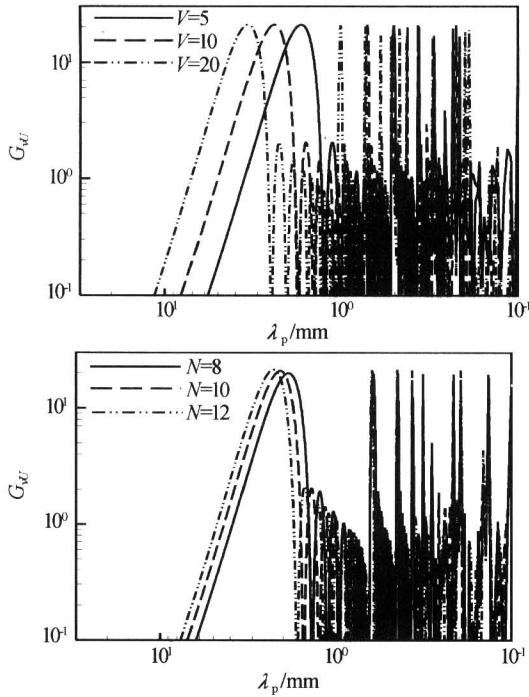


图2 不同传输距离比 V 和放大器片数 N 下的 G_w 比较
Fig.2 Gain spectrum G_w in different V or N

G_{v} 和 G_{w} 的变化也与 G_w 类似,分别如图3和图4. 由此分析可知,传输距离比 V 对极值点位置的影响比较大,而介质片数 N 对增益谱极大值有一

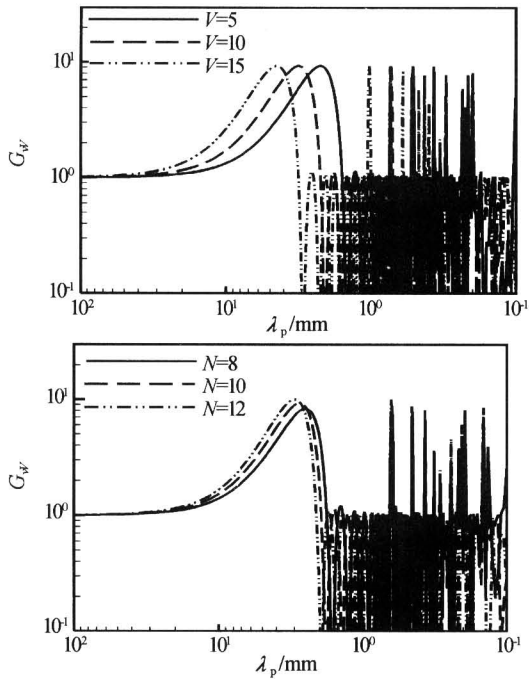


图3 不同传输距离比 V 和放大器片数 N 下的 G_v 比较
Fig.3 Gain spectrum G_v in different V or N

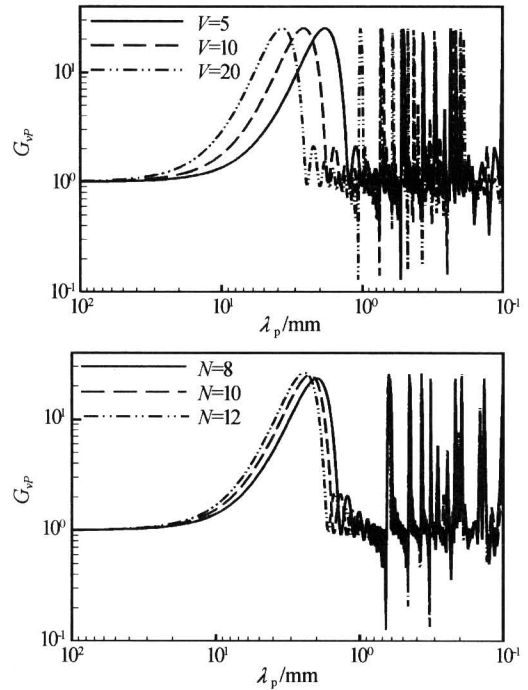


图4 不同传输距离比 V 和放大器片数 N 下的 G_{wp} 比较
Fig.4 Gain spectrum G_{wp} in different V or N

定的影响,同时这两个参数的增大都能够使曲线向长波方向移动.

2.3 增益谱零点和极值点位置的变化

仍以参量同前文的片状放大器为例,考虑增益谱最低频处的峰和零点位置. 模拟得最低频的峰和零点位置随 B 积分值的变化如图5、6. B 积分值一

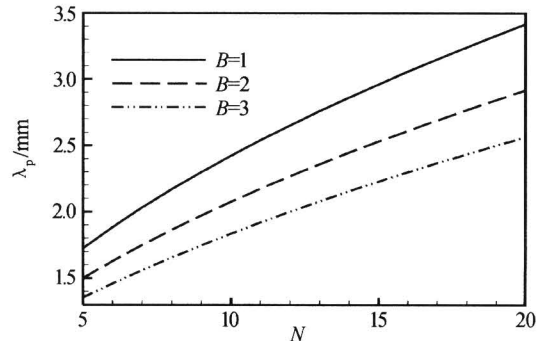


图5 不同 B 积分值对 G_w 最低频峰位置的影响
Fig.5 The lowest frequency peak in different B

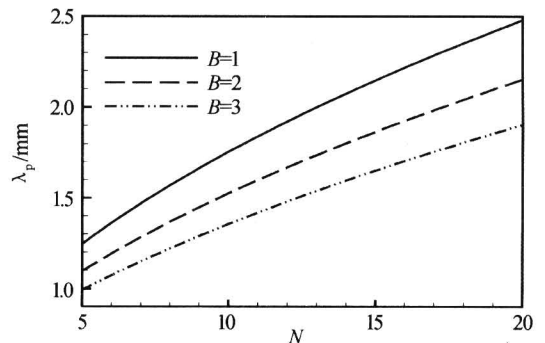


图6 不同 B 积分值对 G_w 最低频零点位置的影响
Fig.6 The lowest frequency zero in different B

定, N 变大时, 最低频的峰和零点向长波方向移动, 且随 N 的增大, 移动的幅度逐渐变小. 而对于放大器片数 N 一定的系统, B 越大, 其最低频峰和零点向长波方向移动的幅度也稍稍变大.

同样, 在 B 积分值一定 ($B=2$) 的情况下考虑 G_{wU} 、 G_{vU} 和 G_{vP} 最低频的峰和零点位置的变化, 可得曲线如图 7、8. G_{wU} 、 G_{vU} 和 G_{vP} 的最低频的峰与零点的位置都是稍稍错开的, 且随着介质片数 N 的增大而向长波方向稳定移动. G_{wU} 与 G_{vP} 的最低频峰与零点位置相当接近, 尤其是零点的位置, 而 G_{vU} 相对 G_{wU} 与 G_{vP} 向长波方向稍稍错开.

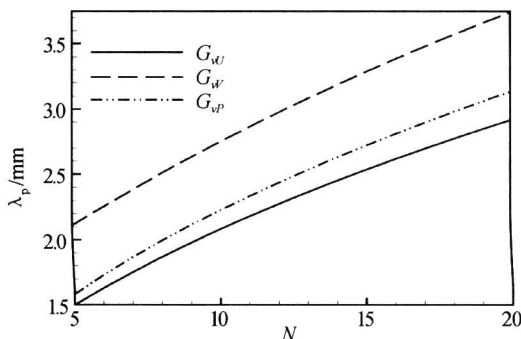


图 7 不同片数 N 对最低频峰位置的影响
Fig. 7 The lowest frequency peak in different N

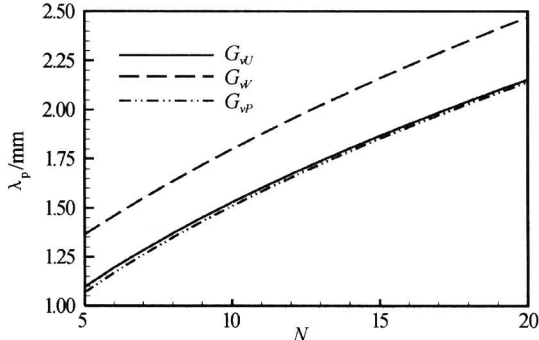


图 8 不同片数 N 对最低频零点位置的影响
Fig. 8 The lowest frequency zero in different N

3 等效处理

如果只关心非线性增益谱, 为了处理方便也可用无空气间隔的增长谱近似表示实际的增益谱. 通过推算, 引入等效功率 $I' = \frac{I_0}{1+b'q}$ 和等效 B 积分 $B' =$

$\frac{1+a'q}{1+b'q}B_0$, 其中 $q = z_v/z_{nl}$, 即可近似地模拟含空气间隔的增益谱. 在这里, 可以取 $a' \approx 0.9 - 1$, $b' \approx 0.88 - 0.95$, 或者具体的对 G_{vU} 取 $a' = 0.915$, $b' = 0.925$; 对 G_{wU} 取 $a' = 0.885$, $b' = 1$; 而对 G_{vP} 则是取 $a' = 0.945$, $b' = 1$, 数值模拟的结果见图 9.

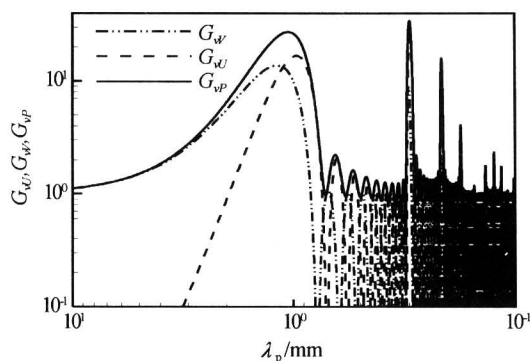


图 9 利用等效功率 I' 和等效 B 积分值 B' 对应的非线性增益谱来近似表示含空气间隔时的非线性增长谱
Fig. 9 The approximative gain spectrum with equivalent power I' and equivalent B -integral B'

4 结论与讨论

通过把介质片厚度和空气间隔转化为线性与非线性传输距离比来讨论系统 B 积分和空气间隔对非线性增益谱的影响. 若其他参量不变, 线性与非线性传输距离比越大, 增益谱向长波方向移动越显著; 而介质片数越多, 增益谱的最高增益越大, 同时谱线向长波方向亦稍稍移动. 放大器片数的增多能使增益谱最低频的峰和零点向长波方向移动, 且随着介质片数的增多, 移动的幅度逐渐变小; 而随着 B 积分值的增大, 增益谱最低频的峰和零点向短波方向移动, 且随着 B 积分值的增大, 移动的幅度也逐渐变小.

在线性化分析理论中, B 积分值作为一个关键参量反复出现, 在小尺度自聚焦现象中起决定性作用. 对于片状放大器系统来说, B 积分值和非线性介质片数目 N 以及介质片间的空气间隔都是其设计的重要指标.

参考文献

- Marburger S H. Self-focusing: theory. *Prog Quant Electr*, 1975, **4**(1): 35~110
- 楚晓亮, 张彬. 超短脉冲在放大介质中传输特性研究. *光子学报*, 2004, **33**(6): 641~644
Chu X L, Zhang B. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 641~644
- Bespalov V I, Talanov V I. Filamentary structure of light beams in nonlinear liquids. *JETP Lett*, 1966, **3**(3): 307~310
- 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. *物理学报*, 2000, **49**(6): 1282~1286
Wen S C, Fan D Y. *Acta Phys Sinica*, 2000, **49**(6): 1282~1286

- 5 赵华君,朱启华,冯国英,等. 高功率超高斯光束传输的非线性补偿研究. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(3): 291~295
Zhao H J, Zhu Q H, Feng G Y, *et al.* *High Power and Particle Beams*, 2004, **16**(3): 291~295
- 6 郑一周,胡巍,陆大全,等. 小尺度自聚焦理论的非傍轴修正. *光子学报*, 2003, **32**(11): 1329~1331
Zheng Y Z, Hu W, Lu D Q, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(11): 1329~1331
- 7 Hunt J T, Manes K R, Renard P A. Hot images from obscurations. *Appl Opt*, 1993, **32**(30): 5973~5987
- 8 Hunt J T, Glaze J A, Simmons W W, *et al.* Suppressing of self-focusing through low-pass spatial filters and relay imaging. *Appl Opt*, 1978, **17**(10): 2053~2057
- 9 陈历学,丁卫强,李文惠,等. 一维非均匀 Kerr 介质的传输矩阵算法. *光子学报*, 2004, **33**(4): 497~500
Chen L X, Ding W Q, Li W H, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 497~500
- 10 Hu Wei, Fu Xiquan, Yu Song, *et al.* Model of small-scale self-focusing and spatial noise in high power laser driver. *Science in China E*, 2002, **45**(4): 373~382

Influence of the Air Gap Between Slabs on Small-scale Self-focusing for Slab Amplifiers

Zhu Jing, Hu Wei, Yi Xunong, Luo Hailu

Laboratory of Light Transmission Optics, South China Normal University, Guangzhou 510631

Received date: 2004-12-07

Abstract Using a linear stability analysis method, a linearizing model derived from the nonlinear schroedinger equation is used to analyze the influence of the air gap between slabs on small-scale self-focusing modulation growth in a slab amplifier of a high power laser facility. The quantitative relations between B-integral, the number of slabs, the ratio of air gap interval distance to the thickness of slab, and nonlinear modulation gain spectrum are given explicitly. It is found that as the gap distance increase, the nonlinear gain spectrum moved toward to long spatial wavelength region. The number of slabs also influence the maximum gain value and its spatial frequency. In addition, an approximate expression was given to show the air gap influence by using a gain spectrum without air gap but with an equivalent power and B-integral value.

Keywords Small-scale self-focusing; Air gap; Modulation growth; B-integral



Zhu Jing was born in 1980, in Hebei Province. She received B. S. degree from the Physics Department of Hebei University. She is now studying for the M. S. degree in the Laboratory of Light Transmission Optics of South China Normal University. Her main research focuses on the transmission optics.