

# 有振幅调制和位相畸变光束的非线性传输\*

张 彬 吕百达

(四川大学激光物理与化学研究所, 成都, 610064)

摘要: 从广义惠更斯-菲涅耳衍射积分和 B 积分定义出发, 并利用统计光学方法, 对有振幅调制和位相畸变光束的非线性传输特性作了详细研究。

关键词: 有振幅调制和位相畸变光束 B 积分 非线性传输

## Nonlinear propagation properties of laser beams with amplitude modulations and phase fluctuations

Zhang Bin, L Baida

(Institute of Laser Physics & Chemistry, Sichuan University, Chengdu, 610064)

**Abstract:** In this paper, starting from the generalized Huygens-Fresnel diffraction integral and B-integral definition, and based on the statistical optics method, the nonlinear propagation properties of laser beams with amplitude modulations and phase fluctuations have been studied in detail.

**Key words:** laser beams with amplitude modulations and phase fluctuations B-integral nonlinear propagation

### 引 言

通常, 在研究激光传输变换特性时, 假设光场为高斯分布, 但实际情况并非都是这样的。在高功率激光系统中, 例如惯性约束聚变(ICF)驱动器, 由于光泵而产生的动态热畸变以及块状光学材料的不均匀性或抛光过程带来光学元件表面缺陷产生的静态畸变的影响, 使激光具有振幅调制和位相畸变<sup>[1]</sup>, 这种畸变具有随机性, 必须用统计光学的方法进行处理。此外, 高功率激光在传输时, 由于光学元件的非线性折射率引起的位相延迟(B积分), 对其传输特性将产生影响<sup>[2~5]</sup>。为了控制非线性位相延迟给激光光束质量带来的破坏, 在对 ICF 驱动器进行优化设计时, 通常要求将级间 B 积分增长值控制在一定数值范围内。另一方面, ICF 驱动器可

\* 国家高技术惯性约束聚变主题项目资助。

- 5 Dixit S N, Thomas I M, Woods B W *et al.* Appl Opt, 1993; 32(14): 2543~ 2554
- 6 Miyanaga N, Matsuoka S, Ando A *et al.* SPIE, 1995; 2633: 183~ 190
- 7 Pepler D A, Danson C N, Ross I N *et al.* SPIE, 1993; 1870: 76~ 87
- 8 Dixit S N, Rushford M C, Thomas I M *et al.* SPIE, 1995; 2633: 141~ 151

\* \* \*

作者简介: 肖 峻, 男, 1958 年出生。副教授, 在职博士生。现主要从事光束的传输变换研究和教学工作。

分解为若干个光学元件和自由空间所组成的基本单元。因此,有必要对高功率激光通过上述光学元件加自由空间基本单元的非线性传输进行研究。为此,我们将从广义惠更斯-菲涅耳衍射积分出发,利用 B 积分概念,对有振幅调制和位相畸变光束通过非线性光学元件后在自由空间的传输特性作了详细分析讨论。

## 1 理论分析

在准单色场近似和高斯型随机位相畸变假设下,即随机位相可认为是各态历经,空间各向同性,而且其平均值为零,有振幅调制和位相畸变光束的场分布可由互强度描述<sup>[1]</sup>

$$J_1(x'_1, x'_2, z=0) = E_1(x'_1, x'_2) \exp[-(x'_1 - x'_2)^2 \sigma_p^2 / L_p^2] \quad (1)$$

式中,  $L_p$  表示位相畸变的尺度,  $\sigma_p^2$  为位相误差幅度。本文计算中设在  $z=0$  处  $E_1(x'_1, x'_2)$  具有振幅调制的高斯分布,即

$$E_1(x'_1, x'_2) = I_0 \left[ \exp\left(-\frac{x'^2_1}{w_0}\right) + \sigma_a^2 \cos\left(L_a \frac{x'_1}{w_0}\right) \right] \left[ \exp\left(-\frac{x'^2_2}{w_0}\right) + \sigma_a^2 \cos\left(L_a \frac{x'_2}{w_0}\right) \right] \quad (2)$$

式中,  $w_0$  为光束的束腰宽度,  $\sigma_a^2$  为振幅调制幅度,  $L_a$  表示振幅调制频率,通常,  $\sigma_a^2$  远小于 1,  $I_0$  为一常数。

令  $x'_1 = x'_2 = x'$ , 可得到入射光强分布为

$$I_1(x') = I_0 \left[ \exp\left(-\frac{x'^2}{w_0}\right) + \sigma_a^2 \cos\left(L_a \frac{x'}{w_0}\right) \right]^2 \quad (3)$$

高功率激光系统中各种光学元件的非线性折射率引起的相位延迟对激光传输特性的影响,可由 B 积分计算。B 积分的定义公式<sup>[2]</sup>

$$B(x') = k \nu \int_0^l I_1(x') dz \approx k M I_1(x') = B_0 \frac{I_1(x')}{I_0} \quad (4)$$

式中,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为波长,  $\nu = 4.19 \times 10^{-3} (n_2/n_0) \text{ cm}^2/W$ ,  $n_0$  为折射率,  $n_2$  为非线性折射率,  $l$  为光学元件长度,  $B_0 = k M I_0$ 。当激光通过这些光学元件时,由 B 积分所引起的位相延迟为

$$\Phi(x') = B(x') \quad (5)$$

互强度经非线性光学元件后在自由空间中的传输由广义惠更斯-菲涅耳衍射积分公式描述<sup>[6]</sup>

$$J(x_1, x_2, z) = \left( \frac{k}{2\pi z} \right) \iint \int e^{-i\Phi(x'_1)} e^{i\Phi(x'_2)} J_1(x'_1, x'_2, z=0) \exp\left\{-\frac{ik}{2z} [(x'_1 - x'_2)^2 - 2(x_1 x'_1 - x_2 x'_2) + (x_1^2 - x_2^2)]\right\} dx'_1 dx'_2 \quad (6)$$

式中,  $k = 2\pi/\lambda$  为波数,  $\lambda$  为波长。将 (1)~(5) 式代入 (6) 式,并令  $x_1 = x_2 = x$ , 可得到光强分布为

$$I(x, N_w) = N_w \int_{-a/w_0}^{a/w_0} \int_{-a/w_0}^{a/w_0} \exp\left\{-iB_0 \left[ e^{-x'^2_1} + \sigma_a^2 \cos(L_a x''_1) \right]^2 \exp\left\{iB_0 \left[ e^{-x'^2_2} + \sigma_a^2 \cos(L_a x''_2) \right]^2 \right\} \right. \\ \left. \left\{ \left[ e^{-x'^2_1} + \sigma_a^2 \cos(L_a x''_1) \right] \left[ e^{-x'^2_2} + \sigma_a^2 \cos(L_a x''_2) \right] \exp\left[-(x''_1 - x''_2)^2 \sigma_p^2 / L_p^2 \right] \right\} \right. \\ \left. \exp\left\{-i\pi N_w \left[ (x''_1 - x''_2)^2 - (2x/w_0)(x''_1 - x''_2) \right] \right\} dx''_1 dx''_2 \right\} \quad (7)$$

式中,  $x''_i = x'_i/w_0$  ( $i=1, 2$ ),  $N_w = w_0^2/l(\lambda)$  为与光束有关的菲涅耳数,与光阑孔径有关的菲涅耳数为  $N_a = a^2/l(\lambda) = (a/w_0)^2 N_w$ ,  $a/w_0$  为截断参数,  $a$  为非线性光学元件宽度。

令 (7) 式中  $\sigma_a^2 = 0$ , 可得到只有位相畸变光束非线性传输的光强分布,令 (7) 式中  $\sigma_p^2 = 0$ , 可

得到只有振幅调制光束的光强分布。当  $B_0 = 0$  时, 由(7)式亦可得到自由空间线性传输的光强分布。

## 2 数值计算和分析

采用(7)式对有振幅调制和位相畸变光束进行数值计算, 典型计算结果示于图 1~ 5。图 1 给出只有位相畸变光束非线性传输的光强分布。图 2 给出只有振幅调制光束非线性传输的光强分布。图 3 给出有振幅调制和位相畸变光束非线性传输的光强分布。为了比较方便, 图 4 给出理想高斯光束非线性传输的光强分布。图 5 给出自由空间线性传输的光强分布。

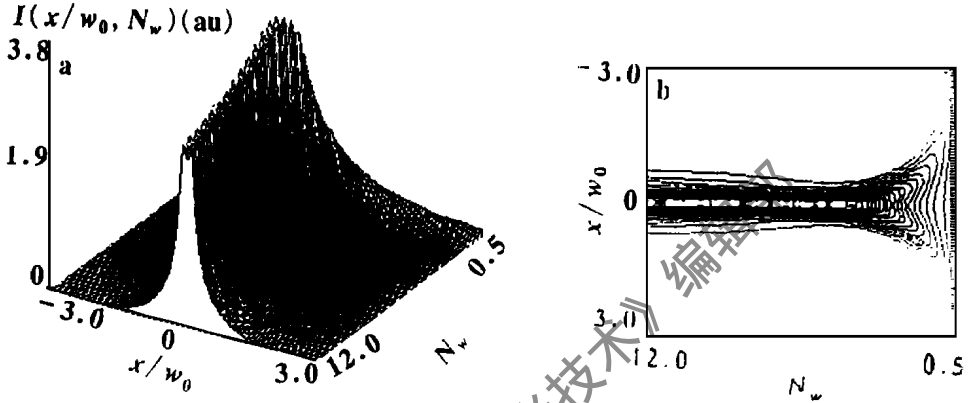


Fig. 1 The nonlinear propagation of a laser beam with only phase fluctuations. The calculation parameters are  $\sigma_p^2/L_p^2 = 5$ ,  $\sigma_a^2 = 0$ ,  $a/w_0 = 2$ ,  $B_0 = 4\pi$ , a—intensity distribution  $I(x/w_0, N_w)$  (arbitrary units); b—contour lines of intensity distribution

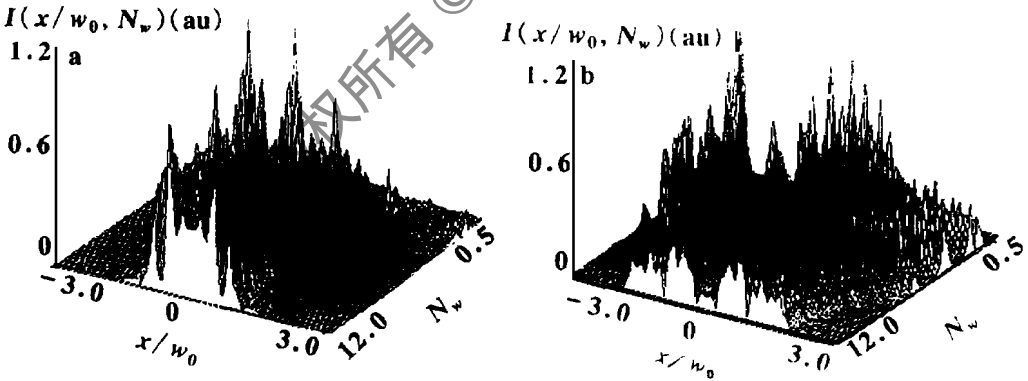


Fig. 2 The nonlinear propagation of laser beams with only amplitude modulations. The intensity is plotted as a function of  $x/w_0$  and  $N_w$ . The calculation parameters are  $\sigma_p^2 = 0$ ,  $\sigma_a^2 = 0.1$ ,  $a/w_0 = 2$ ,  $B_0 = 4\pi$ , a— $L_a^2 = 20$ ; b— $L_a^2 = 40$

由于 B 积分的位相延迟作用将使光束的波前发生明显畸变, 分析图 1 可知, 只有位相畸变光束经非线性传输后, 沿光束传输方向, 光束先会聚, 在某一  $N_w$  (或等效地传输距离  $z$ ) 处会聚最小, 然后, 光束将开始发散, 其作用犹如光束经透镜聚焦一样, 此现象即为光束的自聚焦效应。产生自聚焦的根本原因在于入射光束的光强呈中心强而边缘弱的高斯分布, 相应的 B 积分所引起的位相延迟分布与正透镜所引起的位相延迟分布相似, 亦为中心大而边缘小, 继而

产生与正透镜的聚焦作用类似的自聚焦作用。与此相比较,对于图 5b, c 所示的自由空间线性传输情况,光束却因衍射作用而沿其传输方向一直是发散的。比较图 1 和图 4 可知,只有位相畸变光束经非线性传输后的光强分布比理想高斯光束光滑,且光强极大值更小,自聚焦焦点处光斑尺寸变大,从而使自聚焦程度更小。这是由于位相畸变的存在使光束的空间相干性变差的缘故。进一步分析图 1 和图 4 可知,因 B 积分的位相延迟作用而产生整光束自聚焦时,光束到达自聚焦焦点以后的发散程度比到达焦点以前的会聚程度明显增大,这是由于在光束传输过程中不但存在自聚焦作用而且同时还存在衍射作

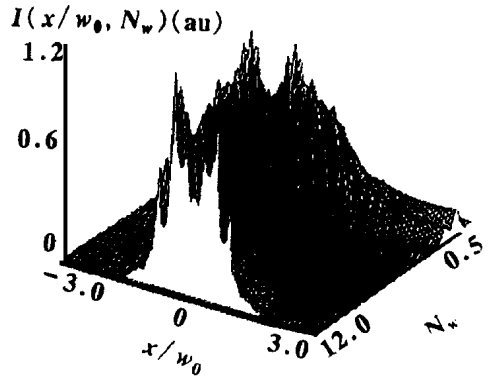


Fig. 3 The nonlinear propagation of a laser beam with both amplitude modulations and phase fluctuations. The intensity is plotted as a function of  $x/w_0$  and  $N_w$ . The calculation parameters are  $\sigma_p^2/L_p^2 = 5$ ,  $\sigma_a^2 = 0.1$ ,  $a/w_0 = 2$ ,  $L_a^2 = 20$ ,  $B_0 = 4\pi$

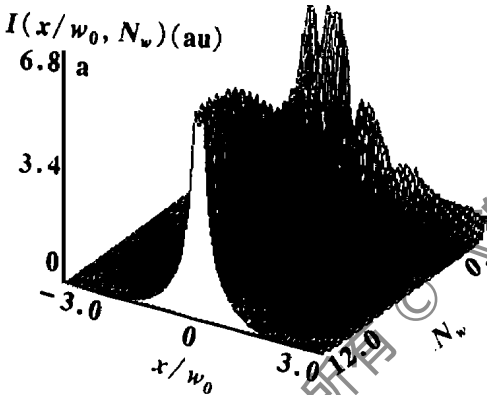


Fig. 4 The nonlinear propagation of a Gaussian beam. The calculation parameters are  $\sigma_p^2/L_p^2 = \sigma_a^2 = 0$ ,  $a/w_0 = 2$ ,  $B_0 = 4\pi$ , a—intensity distribution  $I(x/w_0, N_w)$  (arbitrary units); b—contour lines of intensity distribution

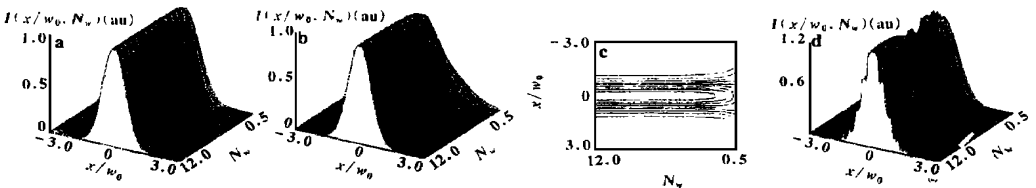
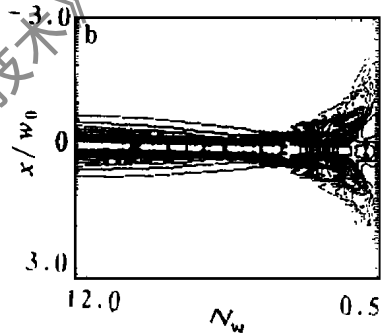


Fig. 5 The intensity distribution of laser beams propagating in free space. The calculation parameters are  $a/w_0 = 2$ ,  $B_0 = 0$ , a—intensity distribution  $I(x/w_0, N_w)$  (a. u.) of a Gaussian beam,  $\sigma_p^2 = \sigma_a^2 = 0$ ; b—intensity distribution  $I(x/w_0, N_w)$  (a. u.) of a laser beam with only phase fluctuations,  $\sigma_p^2/L_p^2 = 5$ ,  $\sigma_a^2 = 0$ ; c—contour lines of intensity distribution of a laser beam with only phase fluctuations,  $\sigma_p^2/L_p^2 = 5$ ,  $\sigma_a^2 = 0$ ; d—intensity distribution  $I(x/w_0, N_w)$  (a. u.) of a laser beam with only amplitude modulations,  $\sigma_p^2 = 0$ ,  $\sigma_a^2 = 0.1$ ,  $L_a^2 = 20$

用,且光束宽度越小,衍射效应所引起光束发散作用越厉害。在光束到达自聚焦焦点以前,一方面,光束宽度因自聚焦作用而减小,另一方面,光束宽度因衍射作用而有所增大,于是,光束的会聚作用因衍射的发散作用将有所缓和,而在到达焦点以后,光束则因产生的非线性效应以

及衍射的发散作用而迅速发散。比较图 1 和图 5b, c, 图 4 和图 5a 可知, 位相畸变光束产生的非线性自聚焦效应比理想高斯光束更小。比较图 2 和图 5d 可见, 由于振幅调制光束的光强分布存在光强起伏, B 积分的存在将引起光强起伏被强烈地放大, 甚至在光束剖面有可能出现光强零值点, 从而使光束分裂成若干独立的被自聚焦的截面, 此即为光束分裂或小尺度自聚焦效应。同时, 比较图 2a 和图 2b 可以看出, 振幅调制频率越高, 经非线性传输后, 光强分布的小尺度调制越大, 光束分裂成的独立自聚焦的截面越多。由图 3 可知, 对于有振幅调制和位相畸变光束, B 积分引起的位相延迟分布为有一定起伏调制的高斯分布, 由于位相畸变的存在, 与只有振幅调制光束相比, 经非线性传输后, 光强分布的小尺度调制将明显减小, 且产生的光束分裂现象亦有所减弱。

### 3 结束语

我们研究了有振幅调制和位相畸变光束的非线性传输特性, 作了较详细的数值计算, 并对计算结果进行了分析讨论。研究结果表明, 当入射光束光强分布为高斯分布时, 将有可能产生整光束自聚焦效应, 且非线性自聚焦效应对位相畸变光束的影响比无畸变的理想高斯光束小。当入射光束存在振幅调制时, 将有可能出现光束分裂的现象, 且振幅调制参数越大, 该现象越明显。当入射光束为振幅调制和位相畸变光束时, 因光束存在位相畸变, 与只有振幅调制光束相比, 产生的光束分裂现象将减弱。由于有振幅调制和位相畸变高功率激光在 ICF 驱动器中通过各种光学元件传输时将有可能产生光束分裂现象, 合理设计的空间滤波器对 B 积分所引起的光强分布小尺度调制增长有抑制作用<sup>[3]</sup>, 因此, 在 ICF 驱动器中放置空间滤波器是非常必要的。另外, 即使光束分裂现象因空间滤波器的作用而明显减弱, 由于入射光束空间分布不均匀所引起的整光束自聚焦现象仍可能存在, 如果其它的光学元件正好位于自聚焦的焦点附近, 则有可能引起光学元件的损伤<sup>[5]</sup>, 因此, 在对高功率激光系统进行设计时, 应避免将光学元件放在自聚焦焦点附近。

### 参 考 文 献

- 1 Manes K R, Simmon W W. J Q S A (A), 1985; 2(4): 528~ 538
- 2 Fleck J A, Morris J R, Bliss E S. IEEE J Q E, 1978; 14(5): 353~ 363
- 3 Simmons W W, Hunt J T, Warren W E. IEEE J Q E, 1981; 17(9): 1727~ 1744
- 4 Kelley P L. Phys Rev Lett, 1965; 15(26): 1005~ 1008
- 5 Fleck J A Jr, Layne C. A P L, 1973; 22(9): 467~ 469
- 6 Shikai T, Asakura T. Optik, 1993; 94(1): 1~ 15
- 7 Shen Y R. The principles of nonlinear optics. John Wiley & Sons Inc, 1984

作者简介: 张 彬, 女, 1969 年 9 月出生。博士生, 副研究员。主要从事激光光束的传输变换的研究。

收稿日期: 1998-05-11