

含空间滤波器的激光放大系统的逆问题^{*}

张 彬 吕百达

(四川大学激光物理与化学研究所, 成都 610064)

(1997 年 5 月 19 日收到; 1997 年 6 月 9 日收到修改稿)

从 Frantz-Nodvik 方程和广义惠更斯-菲涅耳衍射积分出发, 采用快速傅里叶变换和逐次逼近叠代法, 求解含空间滤波器的激光放大系统的逆问题, 即由所要求的输出激光时间、空间波形和能量密度, 并给定放大器和空间滤波器参数情况下, 求输入激光时间波形、振幅和相位分布。

PACC: 4260; 4210; 4255N; 4280B

1 引 言

脉冲宽度为毫微秒和亚毫微秒量级的高功率激光在脉冲激光放大系统(典型例为惯性约束聚变驱动器)中传输时, 由于受到增益非均匀分布、增益饱和、介质吸收、衍射效应以及空间滤波器等光学元器件的影响, 光脉冲的时间波形和空间分布将明显发生变化, 对此已有广泛的研究^[1-5]。然而, 在高功率激光放大系统的设计中, 更为关心的是激光放大系统的逆问题, 即在给定放大系统参数和满足物理实验要求的输出激光脉冲分布前提下, 求出相应的输入激光脉冲分布。由于激光放大器和空间滤波器组成了聚变驱动器放大链的基本单元, 若能解决该单元的逆问题, 则聚变驱动器的逆问题可迎刃而解。目前, 已在考虑放大介质的增益和损耗以及程间损耗和扩束的情况下, 对单程、多级和多程激光放大器的逆问题作了计算分析^[6,7]。如所指出, 空间滤波器在聚变驱动器中对光束质量控制起重要作用^[8-11], 因此, 在研究放大系统逆问题时, 需要从衍射积分的角度考虑空间滤波器的作用。解决含空间滤波器的激光放大系统逆问题的难点是: 计算中不仅涉及到放大介质的逆算问题, 还进一步包括了空间滤波器的逆算, 而且还需要同时计算输入脉冲的空间分布和时间波形。对此, 可利用脉冲分割和薄片增益、损耗模型, 采用快速傅里叶变换(FFT)和逐次逼近叠代相结合的算法来解决。文中所用方法和有关结果可用于聚变驱动器的设计计算。

2 计算模型

在图 1 所示含空间滤波器的放大系统中, 设半宽度为 a 的光阑置于放大介质的前方

^{*} 国家高技术研究发展计划资助的课题。

l_1 处,放大介质后 l_2 处置空间滤波器,两个透镜 F_1, F_2 的焦距分别为 f_1, f_2 ,半宽度为 b 的滤波小孔置于两个透镜的共同焦面上,放大系统的输出面位于空间滤波器后 l_3 处.计算时,应利用 Frantz-Nodvik(F-N)方程和广义衍射积分分别对激光脉冲通过放大介质以及自由空间和空间滤波器的传输进行分析.用本文所提出的方法可计算包括空间和时间变量在内的激光放大系统逆问题,即场分布为 (x, y, z, t) 的函数.为了计算方便,下面的具体讨论只涉及三维 (x, z, t) 情况.

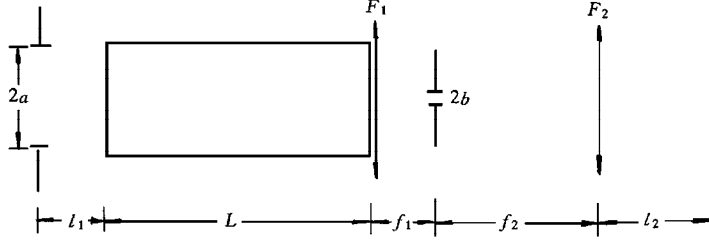


图1 含空间滤波器的激光放大器示意图

从 F-N 方程出发,在集中损耗近似下,计算多程放大的能量密度和增益的公式为^[1]

$$J_{k+1} = TJ_s \ln \{ G_k [\exp(J_k/J_s) - 1] + 1 \}, \quad (1)$$

$$G_{k+1} = G_k \exp[-p(J_{k+1}/T - J_k)/J_s], \quad (2)$$

其中 J_s 为饱和能量密度, $T = e^{-\alpha L}$ 为损耗因子, α 为放大介质的损耗系数, L 为放大介质长度, p 为恢复系数,通常, $1/2 \leq p \leq 1$, 当 $p=1$ 时,放大器增益完全没有恢复,当 $p=1/2$ 时,放大器增益完全恢复.

求解激光放大器逆问题的基本物理思想是采用我们所提出的脉冲分割模型^[5,6],即将多程放大器递推公式(1),(2)中的第 k 和 $k+1$ 程脉冲对应于脉冲分割模型中的第 l 个输入和输出子脉冲,且 $p=1$ (增益完全未恢复).由多程放大的公式(1),(2),推导得出输出激光的第 l 个子脉冲的能量密度和增益为^[6]

$$J_{\text{am, out}}^l(x, z = L) = TJ_s \ln \left\{ G^l(x, L) \left[\exp \left(\frac{J_{\text{am, in}}^l(x, 0)}{J_s} \right) - 1 \right] + 1 \right\}, \quad (3)$$

$$G^{l+1}(x, z = L) = \frac{G^l(x, L) \exp(J_{\text{am, in}}^l(x, 0)/J_s)}{1 + G^l(x, L) [\exp(J_{\text{am, in}}^l(x, 0)/J_s) - 1]}, \quad (4)$$

于是,得到第 l 个子脉冲所对应的光强为

$$I_{\text{am, out}}^l(x, L, t = l\delta) = \frac{J_{\text{am, out}}^l(x, L)}{\delta} \quad \left(-\frac{m}{2} \leq l \leq \frac{m}{2} \right), \quad (5)$$

式中 δ 为子脉冲的脉冲宽度, m 为分割的子脉冲数目.由(5)式可得输出脉冲的光强分布.为了提高计算精度和取消集中损耗近似条件的限制,还使用了薄片增益、损耗模型,即将长度为 L 的放大介质分成 n 个等厚的薄片,在每一片中(长度为 L/n)均存在一增益和损耗分布,并将整个放大介质视为 n 个薄片的串接,按多级放大进行处理,逐级计算^[5].

激光脉冲通过 ABCD 光学系统的传输遵从广义惠更斯-菲涅耳衍射积分^[12]

$$E_{\text{out}}(x, t) = \sqrt{\frac{k}{2\pi B}} \int E_{\text{in}}(x', t) \exp\left[-\frac{ik}{2B}(Ax'^2 - 2x'x + Dx^2)\right] dx', \quad (6)$$

式中 E_{out} 和 E_{in} 分别为出射面和入射面的场分布, A, B, C, D 为相应的传输矩阵元, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为波数, λ 为波长. 值得指出的是, (6) 式省略了对计算结果无影响的激光束的整体相位平移项 $\exp(-ikz)$, 场分布表示式中的变量 z 亦省去.

将自由空间和空间滤波器的传输矩阵分别代入 (6) 式, 可分别得到激光脉冲通过半宽度为 a 的光阑传输以及通过空间滤波器传输的正算公式^[3].

在逆算时, 由 (3), (4) 式得到输入脉冲的第 l 个子脉冲的能量密度为^[6]

$$J_{\text{am}, \text{in}}^l(x, 0) = J_s \ln \left\{ 1 - \frac{1 - \exp[J_{\text{am}, \text{out}}^l(x, L)/(TJ_s)]}{G^l(x, L)} \right\}, \quad (7)$$

于是, 相应的 $t = l\delta$ 时输入脉冲的光强分布为

$$I_{\text{am}, \text{in}}(x, 0, l\delta) = \frac{J_{\text{am}, \text{in}}^l(x, 0)}{\delta}. \quad (8)$$

激光脉冲通过 ABCD 光学系统传输的逆算公式可由 (6) 式直接得出. 将自由空间和空间滤波器的传输矩阵分别代入该逆算公式, 可分别得到激光脉冲通过半宽度为 a 的光阑传输以及通过空间滤波器传输的逆算公式.

对图 1 所示含空间滤波器等光学元件放大系统的逆问题的叠代计算过程为: 1) 在已知的空间滤波器出射面(与空间滤波器的后透镜相距 l_3)的光强分布 I_{out} 情况下, 假设初始相位分布为 $\phi_{\text{sf}, \text{out}}^{(0)}$, 于是, 此处的场分布为 $E_{\text{sf}, \text{out}}^{(0)} = \sqrt{I_{\text{out}}} \exp(i\phi_{\text{sf}, \text{out}}^{(0)})$, 由 FFT^{-1} 求得空间滤波器后透镜出射面的场分布, 再由空间滤波器的逆算公式, 得到空间滤波器前透镜入射面的场分布, 利用 FFT^{-1} 可得出空间滤波器入射面(与空间滤波器前透镜相距 l_2)的场分布 $E_{\text{sf}, \text{in}}^{(0)}$; 2) 由于空间滤波器的入射面即为放大介质的出射面, 因此, $E_{\text{sf}, \text{in}}^{(0)} = E_{\text{am}, \text{out}}^{(0)}$, 于是, $I_{\text{am}, \text{out}}^{(0)} = E_{\text{am}, \text{out}}^{(0)} E_{\text{am}, \text{out}}^{(0)*}$, 在已知放大介质参数(长度、损耗因子、增益分布)的情况下, 利用脉冲分割和薄片增益、损耗模型, 由 (4), (7), (8) 式可求得放大介质入射面的光强分布 $I_{\text{am}, \text{in}}^{(0)}$ ^[6], 通常对激光脉冲通过放大介质传输进行数值模拟时, 均忽略放大介质孔径的衍射效应, 因此, 放大介质的入射面和出射面处的相位分布相同, 即 $\phi_{\text{am}, \text{in}}^{(0)} = \phi_{\text{am}, \text{out}}^{(0)}$, 于是, 得到放大介质入射面处的场分布为 $E_{\text{am}, \text{in}}^{(0)} = \sqrt{I_{\text{am}, \text{in}}^{(0)}} \exp(i\phi_{\text{am}, \text{in}}^{(0)})$; 3) 由 FFT^{-1} , 可求得光阑处的场分布 $E_{\text{fs}, \text{in}}^{(0)}$; 4) 将光阑处的场分布 $E_{\text{fs}, \text{in}}^{(0)}$ 乘以光阑函数 T_{ap} , 再由 FFT 求得放大介质入射面的入射激光场分布 $E_{\text{am}, \text{in}}^{(1)}$; 5) 已知放大介质参数, 由 (3) — (5) 式可得放大介质出射面的光强分布 $I_{\text{am}, \text{out}}^{(1)}$, 且 $\phi_{\text{am}, \text{in}}^{(1)} = \phi_{\text{am}, \text{out}}^{(1)}$, 于是, 放大介质出射面的场分布 $E_{\text{am}, \text{out}}^{(1)} = \sqrt{I_{\text{am}, \text{out}}^{(1)}} \exp(i\phi_{\text{am}, \text{out}}^{(1)})$; 6) 由 FFT 求得空间滤波器前透镜入射面的场分布, 再利用 FFT 得到空间滤波器透镜焦面处的频谱分布, 乘以滤波小孔的透过函数后, 由 FFT^{-1} 求得空间滤波器后透镜出射面的场分布, 再次使用 FFT 可计算得出空间滤波器出射面的场分布 $E_{\text{sf}, \text{out}}^{(1)}$; 7) $E_{\text{sf}, \text{out}}^{(1)}$ 一般与所要求的 $E_{\text{sf}, \text{out}}^{(0)}$ 不相同, 于是作振幅强制, 但保留相位, 令

$E_{\text{sf,out}}^{(2)} = \sqrt{I_{\text{out}}} \exp(i\phi_{\text{sf,out}}^{(1)})$, 重复计算过程 1)–7), 直至计算结果自洽, 即在给定计算误差范围内前后两次的计算结果一致. 设需叠代 k 次, 则所求得的入射面上激光的场分布为 $E_{\text{in}} = E_{\text{ts,in}}^{(k)}$, 该场分布既包含空间分布, 还包含时间波形, 对时间积分便得到入射激光的能量密度.

3 数值计算与结果分析

数值计算采用上述计算模型和方法对磷酸盐钕玻璃放大系统进行. 为了计算方便, 且不失一般性, 设空间滤波器的 $f_1 = f_2 = f$, 且设 $l_2 = l_3 = 0$, 典型数值计算例示于图 2 至图 5. 计算所使用参数: 放大介质的 $J_s = 2.7 \text{ J/cm}^2$, $\alpha = 0.4\% \text{ cm}^{-1}$, $g_0 = 0.05 \text{ cm}^{-1}$, 输出脉冲的时间和空间分布均为 6 阶超高斯分布, 输出脉冲宽度 $\Delta t = 2 \text{ ns}$, 输出激光的束宽 $w = 1 \text{ cm}$, 激光波长 $\lambda = 1.05 \mu\text{m}$, 传输距离 $l_1 = 1.9 \text{ m}$, 空间滤波器的 $f = 0.95 \text{ m}$. 图 2 给出不同输出能量密度情况下, $x = 0$ 处的输入和输出脉冲时间波形. 图 3 给出不同增益分布情况下, $t = -0.3 \text{ ns}$ 时的输入和输出脉冲场分布 ($t = 0$ 时刻对应于输出激光脉冲时间波形的中心处). 图 4 给出不同光阑尺寸情况下, $t = -0.3 \text{ ns}$ 时的输入和输出脉冲场分布. 图 5 给出不同空间滤波器滤波小孔尺寸情况下, $t = -0.3 \text{ ns}$ 时的输入和输出脉冲场分布. 图中实线代表输出激光分布, 虚线代表输入激光分布.

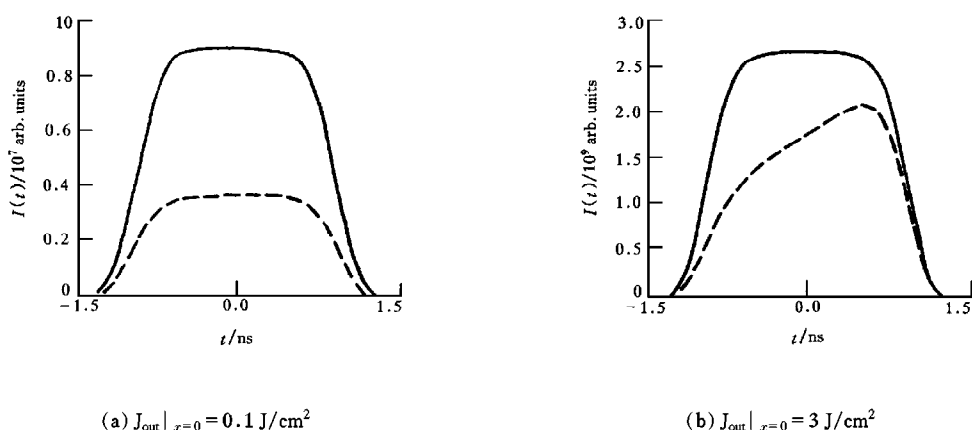


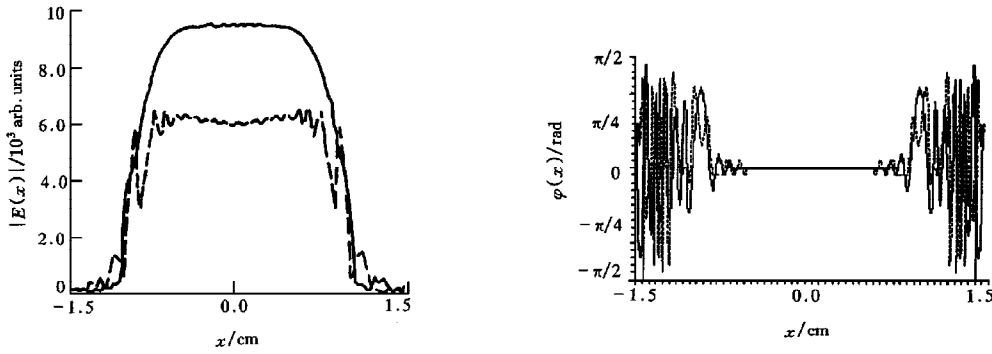
图 2 不同输出能量密度情况下, $x = 0$ 处的输入和输出脉冲时间波形 $a = 1 \text{ cm}$, $b = 250 \mu\text{m}$, $g(x) = g_0$

分析图 2 至图 5, 可得以下几点结论:

1. 由计算知, 输入激光脉冲时间波形与输出激光脉冲时间波形、能量密度和激光放大介质参数有关, 而其空间分布则与输出激光空间分布、放大介质增益分布以及空间滤波器参数、光阑尺寸有关. 图 2 表明, 输入脉冲时间波形的前沿通过放大介质时, 反转粒子数尚未因受激辐射而抽空, 而当脉冲后沿通过时, 前沿引起的受激辐射已使反转粒子数降低, 所以后沿只能得到更小的增益. 因此, 如果要获得图 2 所要求的超高斯分布时间波形

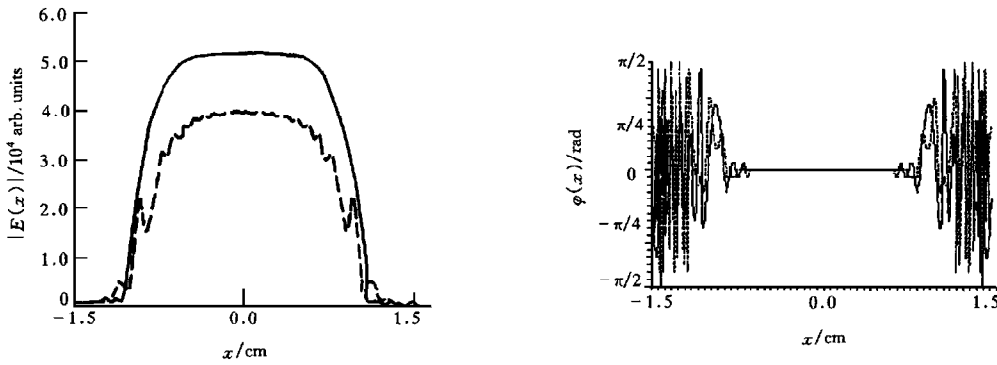
输出脉冲,相应的输入时间波形的前沿应更缓.放大系统中的能量密度越大,增益饱和效应越明显,脉冲波形畸变越大,激光脉冲通过放大系统传输所获得的放大倍数越小.

2. 对图 3 所示的增益分布非均匀(如抛物线分布)的情况,放大系统的输入和输出激光的空间分布存在明显的差别.



(a) 振幅分布, $g(x) = g_0(1 - x^2)$, $J_{\text{out}}|_{x=0} = 0.1 \text{ J/cm}^2$

(b) 相位分布, $g(x) = g_0(1 - x^2)$, $J_{\text{out}}|_{x=0} = 0.1 \text{ J/cm}^2$



(c) 振幅分布, $g(x) = g_0(1 + x^2)$, $J_{\text{out}}|_{x=0} = 3 \text{ J/cm}^2$

(d) 相位分布, $g(x) = g_0(1 + x^2)$, $J_{\text{out}}|_{x=0} = 3 \text{ J/cm}^2$

图 3 不同增益分布情况下, $t = -0.3 \text{ ns}$ 时的输入和输出脉冲场分布 $a = 1 \text{ cm}$, $b = 250 \mu\text{m}$

3. 图 4 表明,对于不同的光阑尺寸,相应的输入激光空间分布也不同.当光阑尺寸较小(图 4(a)中 $a = 1 \text{ cm}$)时,由于激光光束在传输过程中将受到光阑的衍射效应,因此,要得到所要求的输出激光光强分布(如超高斯分布),输入激光的振幅分布将存在明显的小尺度调制,相应的振幅分布起伏也较大.当光阑尺寸较大(图 4(c)中 $a = 1.25 \text{ cm}$)时,由于此时光阑的衍射效应几乎可以忽略,且从光阑到放大介质的传输距离 l_1 很近,激光脉冲经光阑传输到放大介质入射面时的场分布与入射光束的场分布几乎相同.因此,计算所得的输入激光脉冲的空间分布不存在小尺度调制.此时,输入激光空间分布仅由输出激光和放大介质的增益分布所决定.

4. 空间滤波器是高功率激光放大系统中控制光束质量的有效措施之一. 由图 3 可以看出, 空间滤波器的作用是在其傅里叶变换面上, 用滤波小孔滤去入射光束中的高频分量, 以减小输出激光光强分布的小尺度调制. 空间滤波器输入透镜的焦距为 f 时, 直径为 $2b$ 的滤波小孔所对应的截止频率为 $\nu = \frac{2\pi b}{\lambda f}$ ^[9], 可滤去光束光强分布中空间波长小于 $s = \frac{\lambda f}{b}$ 以下的空间调制, 对于图 5 中不同的空间滤波小孔的尺寸, 空间截止频率不同, 图 5(a) 和 (b) 中空间截止频率为 $\nu_1 = 15.7 \text{ cm}^{-1}$ (相应的滤波小孔尺寸 $b = 250 \mu\text{m}$), 对应的滤波

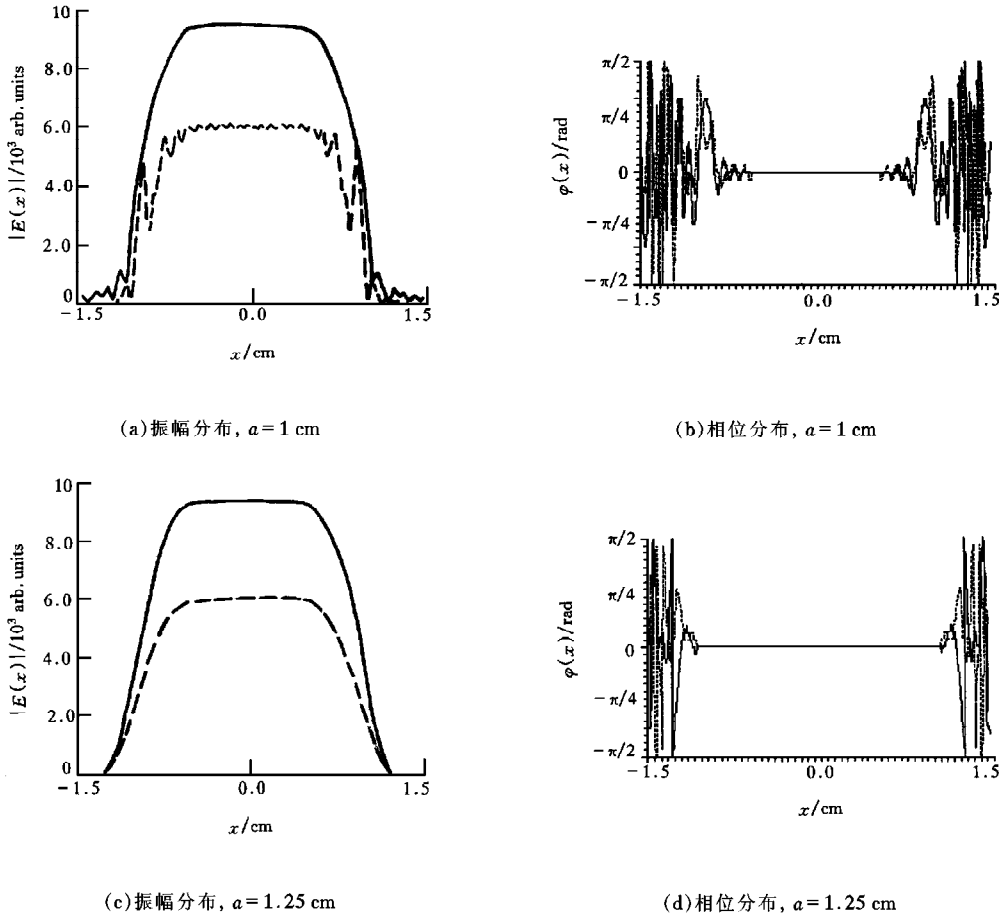


图 4 不同光阑尺寸情况下, $t = -0.3 \text{ ns}$ 时的输入和输出脉冲场分布 $b = 250 \mu\text{m}$, $g(x) = g_0$, $J_{\text{out}}|_{x=0} = 0.1 \text{ J/cm}^2$

小孔所能滤去的空间波长小于 $s = 4 \text{ mm}$ 的空间调制尺度, 图 5(c) 和 (d) 中空间截止频率为 $\nu_2 = 1.9 \text{ cm}^{-1}$ (相应的 $b = 30 \mu\text{m}$), 对应的滤波小孔所能滤去的空间波长小于 $s = 33.3 \text{ mm}$ 的空间调制尺度. 若将图 5 中计算出的输入激光作为参数相同的系统的入射, 通过数值计算可得到在空间滤波器的傅里叶变换面上光强分布的中心亮斑尺寸为 $b' = 50 \mu\text{m}$, 空间截止频率为 $\nu_0 = 3.1 \text{ cm}^{-1}$. 当滤波小孔尺寸 b 小于 b' (如图 5(c) 中 $b = 30 \mu\text{m}$) 时, 其

空间截止频率小于 b' 所对应的截止频率 ν_0 , 输出光强分布与所要求的分布相比, 存在大尺度的空间调制, 这是由于滤波小孔太小所引起的强烈的衍射效应造成的. 因此, 滤波小孔的合理选取在高功率激光放大系统设计中至关重要.

5. 输入激光的相位分布在大部分范围内变化甚小, 在靠近激光束边缘的部分变化剧烈. 光阑尺寸越大, 变化剧烈范围越小(比较图 4(b)和(d)), 空间滤波小孔尺寸越小, 激光束边缘部分的相位变化越缓(比较图 5(b)和(d)).

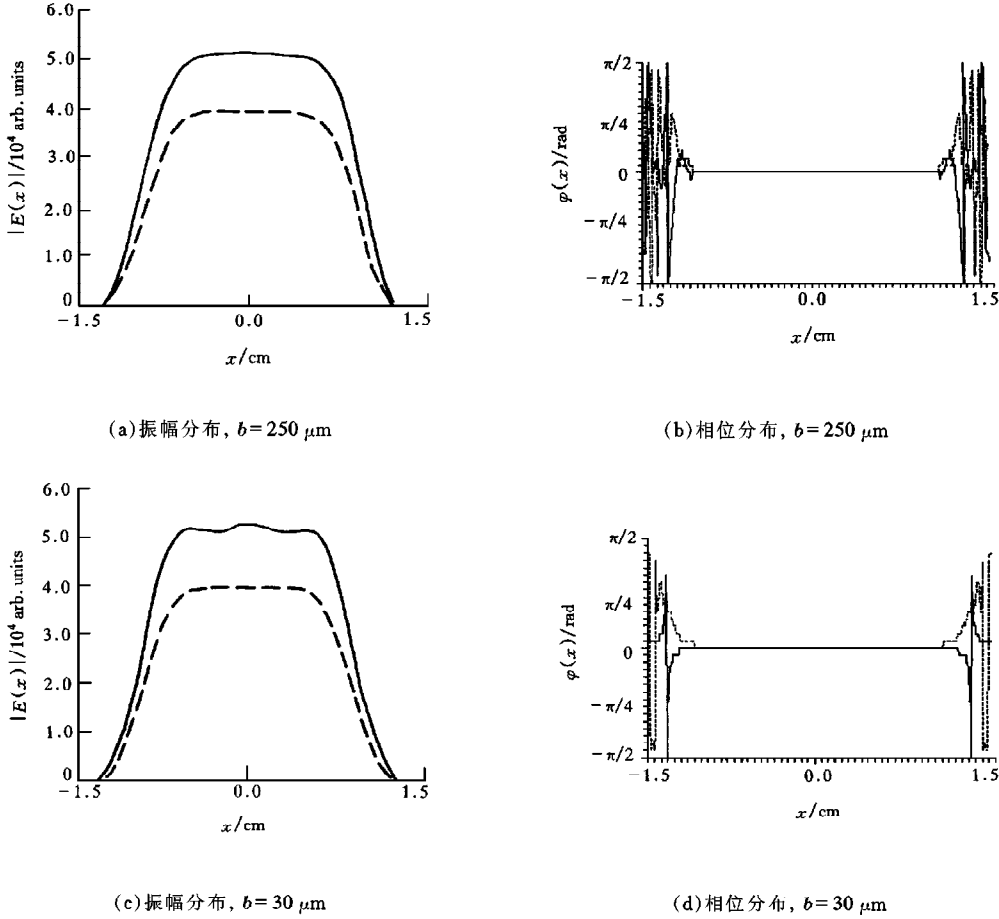


图 5 不同空间滤波器滤波小孔尺寸情况下, $t = -0.3 \text{ ns}$ 时的输入和输出脉冲场分布 $a = 1.25 \text{ cm}$, $g(x) = g_0$, $J_{\text{out}}|_{x=0} = 3 \text{ J/cm}^2$

4 结 语

本文对含空间滤波器的高功率激光放大系统的逆问题进行了详细研究和数值模拟. 该问题可视为含增益介质的逆衍射时间-空间问题, 计算收敛性和收敛速度都与初始相位选取有关. 所用方法实质上是在我们提出解决放大器逆问题物理模型上加上处理逆衍射问题叠代算法, 后者与二元光学元件设计算法^[13-16]类似, 不过取消了对输入场的振幅强

制.数值计算的正确性已用正算作了校核.本文所用方法推广至柱对称激光放大系统的逆算是直截了当的.对矩形截面激光放大系统,场分布为 (x, y, z, t) 的函数,将文中一维FFT和 FFT^{-1} 算法用二维FFT和 FFT^{-1} ^[17]代替,即可解决.除计算机时增加外,不会遇到原则性困难.该项工作的意义在于为高功率激光放大系统的设计提供了一个逆算方法和计算程序,并可用于对聚变驱动器前端的参数,包括输出激光能量密度、整形脉冲时间和空间波形等的计算设计.当涉及新一代聚变驱动器,即多级和多程阵列组合式放大系统^[18]逆算时,难度将进一步增加,但仍可用本文提出方法推广后予以解决.有关工作正在进行中.

- [1] W.H.Lowdermilk, J.E.Murray, *J. Appl. Phys.*, **51**(1980),2436.
- [2] 范滇元、余文炎, *J. Lasers*, **7**(1980),1.
- [3] W.W.Simmons, J.T.Hunt, W.E. Warren, *IEEE J. Quant. Electron.*, **17**(1981),1727.
- [4] I.Yasukazu, Y.Kunio, *IEEE J. Quant. Electron.*, **17**(1981),1639.
- [5] 张 彬、吕百达,中国激光,**A23**(1996),1061.
- [6] Baida Lü, Bin Zhang, *Opt. Commun.*, **130**(1996),279.
- [7] 张 彬、吕百达,中国激光,**A24**(1997),495.
- [8] J.T.Hunt, P.A.Renard, W.W.Simmons, *Appl. Opt.*, **16**(1977),779.
- [9] 王桂英、赵九源、张明科等,物理学报,**34**(1985),171.
- [10] 王桂英、陈时胜、余文炎等,光学学报,**4**(1984),1.
- [11] 陈时胜、毕无忌、王笑琴等,光学学报,**3**(1984),259.
- [12] 吕百达,激光光学——激光束的传输变换和光束质量控制,第二版(四川大学出版社,成都,1992).
- [13] 顾本源、杨国桢等,物理学进展,**8**(1988),365.
- [14] 陈岩松,量子电子学,**13**(1996),13.
- [15] J.R.Fienup, *Appl. Opt.*, **21**(1982),2758.
- [16] G.Yang, B.Dong, B.Cu *et al.*, *Appl. Opt.*, **33**(1994),209.
- [17] J.W.Goodman, Introduction to Fourier Optics(McGraw-Hill,1968).
- [18] LLNL, ICF Quarterly Report, Special Issue:Beamlet Laser Project, UCRL-LR-105821-95-15(1994),18.

INVERSE PROBLEM OF A LASER AMPLIFIER SYSTEM CONTAINING A SPATIAL FILTER

ZHANG BIN 吕 BAI-DA

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

(Received 19 May 1997; revised manuscript received 9 June 1997)

ABSTRACT

Starting from the Frantz-Nodvik equation and Huygens-Fresnel diffraction integral and using the fast Fourier transform and successive iteration method, we studied the inverse problem of a laser amplifier system containing a spatial filter, i. e., to find the initial input temporal pulse profile, amplitude and phase distributions from the required output temporal, spatial pulse profile and fluence, as well as the given amplifier and spatial filter parameters.

PACC: 4260; 4210; 4255N; 4280B