

多级和多程脉冲激光放大器的逆问题*

张 彬 吕百达

(四川大学激光物理与化学研究所 成都 610064)

提要 采用脉冲分割模型和逐次逼近迭代法,对任意空间和时间分布波形的激光通过任意增益分布多级和多程激光放大系统传输的逆问题,即给定输出脉冲和多级/多程放大系统参数,求输入脉冲波形和能量密度,作了详细研究和计算模拟。

关键词 多级和多程脉冲激光放大器,空间和时间分布波形,激光放大器的逆问题,逐次逼近迭代法

1 引 言

为了获得高能量高功率激光,常采用多级和多程放大系统,惯性约束聚变(ICF)驱动器为其典型例子^[1,2]。脉宽为 ns 和亚 ns 量级的高功率激光在多级和多程脉冲激光放大系统中传输时,由于受到增益非均匀分布、增益饱和和介质吸收等的影响,光脉冲的时间波形和空间分布将明显发生变化。在高功率激光放大系统的设计中,所关心的一个问题是如何在给定放大系统参数和满足物理实验要求的输出脉冲波形前提下,求出相应的输入脉冲波形。因此,对任意空间和时间分布波形的激光通过任意增益分布的多级和多程脉冲放大系统传输的逆问题进行研究具有重要的实际意义。迄今,国内外对 ICF 驱动器中脉冲放大器的正问题,即已知输入脉冲和放大器参数,由 F-N 方程^[1]求解输出脉冲参数,已作了许多研究。但对逆问题,尤其是多程放大器的逆问题尚未见文献报道,本文将在我们对单程脉冲放大器逆问题工作基础上,对多级和多程脉冲激光放大器的逆问题进行详细讨论。

2 多级激光放大系统

通常,多级激光放大系统主要单元有放大器、空间滤波器、光束变换器、注入与输出镜等。在研究多级激光放大系统的逆问题时,可根据放大系统的总体排布图,逐级进行计算。具体来说,假设放大系统有 n 级,第 i ($1 \leq i \leq n$) 级放大介质的长度为 L_i ,第 i 级放大器的输入激光的能量密度为^[3]

$$E_{in}^i(x, y, z_i) = E_s \ln \left[1 - \frac{1 - e^{E_{out}^i(x, y, z_i + L_i)/(T^i E_s)}}{G^i(x, y, z_i + L_i)} \right] \quad (1)$$

* 国家高技术惯性约束聚变委员会资助项目。

式中, $T^i = \exp(-\alpha L_i)$ 和 $G^i = \exp[\sigma \int_{z_i}^{z_i+L_i} N_0(x, y, z) dz]$ 分别为第 i 级放大器的损耗因子和小信号增益, α 为放大介质的吸收系数, σ 为发射截面, E_s 为饱和能量密度, N_0 为初始反转粒子数密度, z_i 为第 i 级输入面的位置坐标。

由于各级放大器间均存在空间滤波器和光束变换器等, 从而引入一定的损耗, 因此, 第 i 级放大器的输出能量密度与第 $i+1$ 级放大器的输入能量密度的关系为

$$E_{in}^{i+1}(x, y, z_i + L_i + l_i) = T_i E_{out}^i(x, y, z_i + L_i) \quad (2)$$

式中, l_i 为两级间的距离, T_i 为 i 和 $i+1$ 级间光学元件引入的损耗因子, 计算中还应计及因扩束引起的能量密度的减小。

采用脉冲分割模型和薄片损耗模型^[4]以及(1), (2)式, 可同时计算输入脉冲的空间分布和时间波形, 即使在损耗较大的情况下, 也能得到较好的结果。

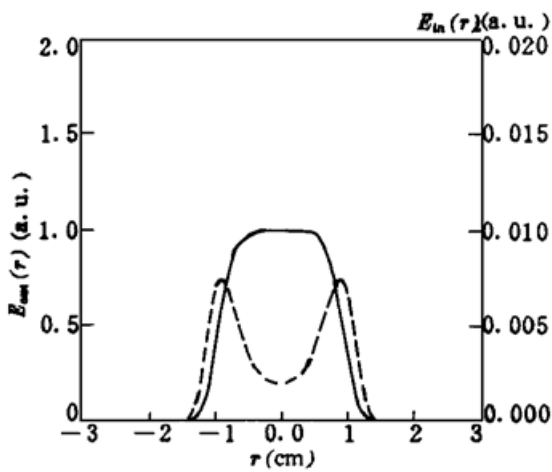


图 1 三级放大器的输入和输出激光脉冲的能量密度空间分布。小信号增益系数 $g_0 = g_{00}(1 - r^2/4)$ dB/cm, g_{00} : $r = 0$ 处的增益系数, 输出激光脉冲具有 6 阶超高斯空间分布和高斯时间波形, 且 $E_{out}|_{r=0} = 1$ J/cm²。——: 输出能量密度 E_{out} , ——: 输入能量密度 E_{in}

Fig. 1 The initial and output spatial pulse profiles of a 3-stage amplifier. The small-signal gain coefficient $g_0 = g_{00}(1 - r^2/4)$ dB/cm, g_{00} : gain coefficient at $r = 0$, the output pulse has a 6-order super-Gaussian profile in the space domain, a Gaussian profile in the time domain, and $E_{out}|_{r=0} = 1$ J/cm². ——: output fluence E_{out} , ——: initial fluence E_{in}

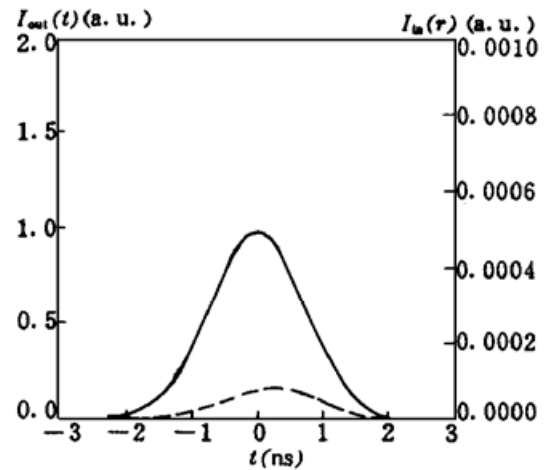


图 2 三级放大器的输入和输出脉冲在 $r = 0$ 处光强的时间波形。小信号增益系数 $g_0 = g_{00}(1 - r^2/4)$ dB/cm, 输出激光脉冲具有 6 阶超高斯空间分布和高斯时间波形, 且 $E_{out}|_{r=0} = 1$ J/cm²。——: $r = 0$ 处的输出脉冲时间波形 $I_{out}(t)$, ——: $r = 0$ 处的输入脉冲时间波形 $I_{in}(t)$

Fig. 2 The initial and output temporal pulse profiles of a 3-stage amplifier at $r = 0$. The gain coefficient $g_0 = g_{00}(1 - r^2/4)$ dB/cm, the output pulse has a 6-order super-Gaussian profile in the space domain, a Gaussian profile in the time domain, and $E_{out}|_{r=0} = 1$ J/cm². ——: output temporal pulse profile $I_{out}(t)$ at $r = 0$, ——: initial temporal pulse profile $I_{in}(t)$ at $r = 0$

对三级磷酸盐钕玻璃棒状放大系统进行数值计算。典型例子示于图 1, 2。计算所使用参数为: 受激发射截面 $\sigma = 3.5 \times 10^{-20}$ cm², 饱和能量密度 $E_s = 2.7$ J/cm², 动态吸收系数 $\alpha = 0.4$ % cm⁻¹, 三级放大器尺寸分别为 $\phi 20 \times 350$ mm², $\phi 40 \times 350$ mm² 和 $\phi 70 \times 350$ mm², 假设光束口径为放大器尺寸的 90%, 各放大器中心处的小信号增益系数分别为 $g_{00} = 0.16$ dB/cm, 0.084

dB/cm, 0.044 dB/cm。各级间空间滤波器的插入损耗为 $T_i = 0.8$ 。图 1 给出输入和输出激光脉冲的能量密度空间分布。图 2 为输入和输出脉冲在 $r = 0$ 处光强的时间波形。

分析图 1 可知, 对于增益分布非均匀(如抛物线分布)的情况, 激光脉冲通过多级放大系统后, 其空间分布因增益非均匀分布而产生明显畸变。由图 2 可见, 由于输入脉冲时间波形的前沿通过工作物质时, 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, 如果要获得图中所要求的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。

3 多程激光放大系统

多程放大系统能有效地提高放大系统的效率, 降低系统造价, 因而受到重视。在集中损耗近似下, 描述多程放大第 k 程的能量密度和增益的表达式为^[3]

$$E_k = E_s \ln \left[1 - \frac{1 - \exp \left[\frac{E_{k+1}}{TE_s} \right]}{G_k} \right] \quad (3)$$

$$G_{k+1} = \frac{G_k \exp \left[\frac{pE_k}{E_s} \right]}{\left[1 + G_k \left[\exp \left[\frac{E_k}{E_s} \right] - 1 \right] \right]^p} \quad (4)$$

其中, p 为恢复系数, 它描述多程放大器的弛豫效应和脉冲时间间隔对增益的影响。 $\frac{1}{2} \leq p \leq 1$, 当 $p = 1$, 即热化与排空效应都可以忽略不计, 放大器增益完全没有恢复, 当 $p = \frac{1}{2}$, 即不考虑终态排空效应的影响, 放大器增益完全恢复。

与单程放大器和多级放大器不同的是, 对多程放大器, 因激光在同一放大介质中往返传输, 使逆问题变得复杂。首先, 以双程放大为例, 对逆问题进行求解。对于双程放大的计算公式为

$$E_{1in} = E_s \ln \left[1 - \frac{1 - \exp \left[\frac{E_{1out}}{T_1 E_s} \right]}{G_1} \right] \quad (5)$$

$$E_{2in} = E_s \ln \left[1 - \frac{1 - \exp \left[\frac{E_{2out}}{T_2 E_s} \right]}{G_2} \right] \quad (6)$$

$$G_2 = \frac{G_1 \exp \left[\frac{pE_{1in}}{E_s} \right]}{\left[1 + G_1 \left[\exp \left[\frac{E_{1in}}{E_s} \right] - 1 \right] \right]^p} \quad (7)$$

$$E_{2in} = T' E_{1out} \quad (8)$$

式中, $E_{1in}, E_{1out}, G_1, T_1$ 分别为第一程的输入、输出能量密度, 初始增益及损耗因子, $E_{2in}, E_{2out}, G_2, T_2$ 分别为第二程的输入、输出能量密度, 初始增益及损耗因子; T' 为两程之间的空间滤波器引入的损耗因子, 计算中还应计及因扩束引起能量密度的减小。将(6) ~ (8)式代入(5)式, 可得到关于输入能量密度的方程

$$1 - \frac{[1 + G_1(e^{E_{\text{lin}}/E_s} - 1)]^p [1 - e^{E_{2\text{out}}/(T_2 E_s)}]}{G_1 e^{p E_{\text{lin}}/E_s}} = [G_1(e^{E_{\text{lin}}/E_s} - 1) + 1]^{T_1 T'} \quad (9)$$

先假设 $T_1 T' \approx 1$, 当 $p = 1$ (完全未恢复) 时, 方程(9) 化简为关于输入能量密度的一元二次方程 $G_1^2 (e^{E_{\text{lin}}/E_s})^2 - \{G_1^2 + G_1[e^{E_{2\text{out}}/(T_2 E_s)} - 1]\} e^{E_{\text{lin}}/E_s} - (1 - G_1)[e^{E_{2\text{out}}/(T_2 E_s)} - 1] = 0$ (10) 当 $p = 0.5$ (完全恢复) 时, 方程(9) 化简为关于输入能量密度的一元三次方程

$$(e^{E_{\text{lin}}/E_s})^3 - 2(e^{E_{\text{lin}}/E_s})^2 + \left[1 - \frac{[e^{E_{2\text{out}}/(T_2 E_s)} - 1]^2}{G_1^3}\right] e^{E_{\text{lin}}/E_s} + \frac{G_1 - 1}{G_1^4} [e^{E_{2\text{out}}/(T_2 E_s)} - 1]^2 = 0 \quad (11)$$

利用(9) 式作数值计算, 可由 $E_{2\text{out}}$ 和放大器参数求出 E_{lin} 。但对 $p = 1$ 或 0.5 时, 更为方便的计算步骤如下: 由(10) 或(11) 式求得符合物理意义的解作为第一程的输入能量密度 E_{lin} , 代入(7) 式计算得第二程的增益 G_2 后, 再由(6) 式求得第二程的输入能量密度, 除以 T' 得到第一程的输出能量密度, 代入(5) 式后得到输入能量密度 E'_{lin} 。由于(10), (11) 式是 $T_1 T' \approx 1$ 的近似结果, 因此, 直接由(10) 或(11) 式得到的结果 E_{lin} 与由(5) 式计算所得 E'_{lin} 存在差异, 可将上述的计算结果代替 E_{lin} , 再代入(7) 式计算得到 G_2 , 再由(6) 式求得 $E_{2\text{in}}$, 最后由(5) 式得到 E''_{lin} , 如此反复逐次逼近迭代计算, 当前后两次的计算结果趋于一致时, 即为所求逆问题的计算结果。

上述方法实质上是将两程放大的逆问题简化为单程放大的逆问题, 从原则上解决了任意程放大的逆问题。现以三程放大的逆问题为例说明, 可分为四个步骤, 1) 在已知第三程输出能量密度 $E_{3\text{out}}$, 第一程增益 G_1 和第一、二程和第二、三程之间的恢复系数 D 的前提下, 先粗略假设第一、二程的增益相等 ($G_1 = G_2$, 且均为初始增益), 将三程问题简化成两程问题, 由上述的两程放大逆问题的计算方法可求得第二程的输入能量密度 $E_{2\text{in}}$; 2) 由 $E_{2\text{in}}$ 求得第三程的增益 G_3 后, 再由已知的第三程能量密度 $E_{3\text{out}}$, 依次计算第三程的输入能量密度 $E_{3\text{in}}$ 和第二程的输出能量密度 $E_{2\text{out}}$; 3) 由计算得到的 $E_{2\text{in}}$, 依次求得第一程的输出能量密度 $E_{1\text{out}}$, 第一程的输入能量密度 E_{lin} , 第二程的增益 G_2' , 然后, 由 2) 计算得到的 $E_{2\text{out}}$, 求得第二程的输入能量密度 $E'_{2\text{in}}$, 由于 $E_{2\text{in}}$ 是在第一、二程的增益相同的粗略假设下得到的, 而 $E'_{2\text{in}}$ 是在对 G_2 作了修正的 G_2' 后的计算结果, 因而 $E_{2\text{in}}$ 和 $E'_{2\text{in}}$ 存在差异; 4) 将 $E'_{2\text{in}}$ 代替 $E_{2\text{in}}$, 重复 2), 3), 迭代计算直到前后两次计算结果 $E'_{2\text{in}}$ 和 $E_{2\text{in}}$ 趋于一致, 最后由 3) 计算 E_{lin} , 得到三程放大的逆问题计算结果。这样, 采用脉冲分割模型和逐次逼近迭代法, 可同时计算输入脉冲的空间分布、时间波形和能量密度。

对三程磷酸盐钕玻璃片状放大系统所作的典型数值计算示于图 3, 4。计算所使用参数为: 放大介质有效长度为 200 mm, 中心处的小信号增益系数 $g_{00} = 0.06$ dB/cm, 第一、二程间的空间滤波器的损耗因子为 $T = 0.8$, 光束面积放大为 1.5 倍, 第二、三程间的反射镜的损耗因子为 $T = 0.98$, 其余参数同前。图 3 给出输入和输出激光脉冲的能量密度空间分布。图 4 为输入和输出脉冲在 $r = 0$ 处光强的时间波形。

分析图 3 可知, 对于增益分布非均匀(如抛物线分布)的情况, 由于增益存在非均匀分布, 多程放大器的输入激光脉冲的空间分布与输出激光脉冲的空间分布存在明显差别。由图 4 可见, 由于输入脉冲时间波形的前沿消耗的反转粒子数比其后沿多, 因此, 要获得图 4 所要求的复杂时间分布输出激光脉冲^[5](称为“尖栅栏形”脉冲), 相应的输入时间波形的前沿应更缓。同时可以看出, $p = 0.5$ (增益完全恢复) 时多程放大系统的放大倍数比 $p = 1$ (增益完全未恢复) 时大, 这是因为 $p = 0.5$ 时第二、三程的增益比 $p = 1$ 时大的缘故。因此, 对于给定的输出脉冲, 输入脉冲的空间和时间波形以及放大器的放大倍数均与输出脉冲波形、输出能量密度和多程放大器的增益恢复系数等有关。

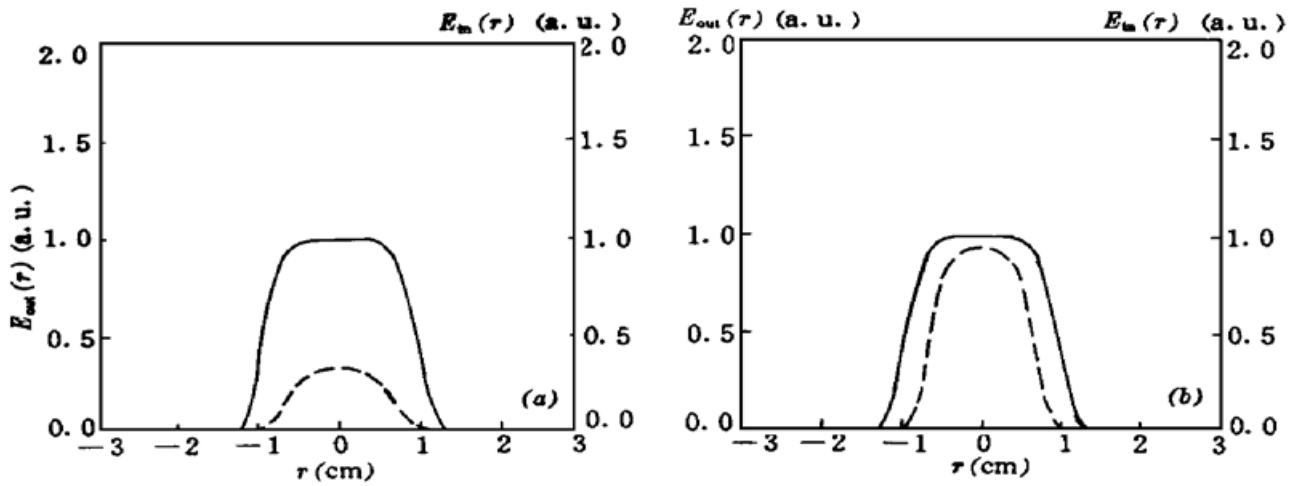


图3 三程放大器的输入和输出激光脉冲的能量密度空间分布。(a) $p = 0.5$, 增益系数 $g_0 = g_{00}(1 + r^2/4)$ dB/cm, 输出激光脉冲具有6阶超高斯空间分布和“尖栅栏形”时间波形, 且 $E_{out}|_{r=0} = 3 \text{ J/cm}^2$; (b) $p = 1$, 增益系数 $g_0 = g_{00}(1 + r^2/4)$ dB/cm, 输出激光脉冲具有6阶超高斯空间分布和“尖栅栏形”时间波形, 且 $E_{out}|_{r=0} = 3 \text{ J/cm}^2$ 。——: 输出能量密度 E_{out} , ——: 输入能量密度 E_{in}

Fig. 3 The initial and output spatial pulse profiles of a 3-pass amplifier. (a) $p = 0.5$, the gain coefficient $g_0 = g_{00}(1 + r^2/4)$ dB/cm, the output pulse has a 6-order super-Gaussian profile in the space domain, a picket-fence type temporal profile in the time domain, and $E_{out}|_{r=0} = 3 \text{ J/cm}^2$; (b) $p = 1$, the gain coefficient $g_0 = g_{00}(1 + r^2/4)$ dB/cm, the output pulse has a 6-order super-Gaussian profile in the space domain, a picket-fence type temporal profile in the time domain, and $E_{out}|_{r=0} = 3 \text{ J/cm}^2$. ——: output fluence E_{out} , ——: initial fluence E_{in}

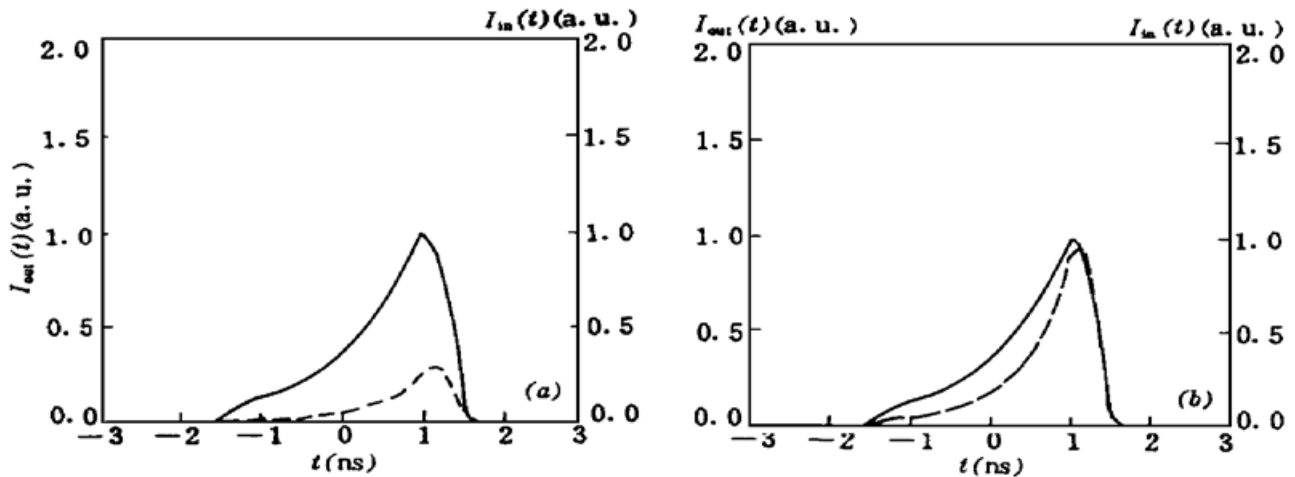


图4 三程放大器的输入和输出脉冲在 $r = 0$ 处光强的时间波形。(a) $p = 0.5$, 增益系数 $g_0 = g_{00}(1 + r^2/4)$ dB/cm, 输出激光脉冲具有6阶超高斯空间分布和“尖栅栏形”时间波形, 且 $E_{out}|_{r=0} = 3 \text{ J/cm}^2$; (b) $p = 1$, 增益系数 $g_0 = g_{00}(1 + r^2/4)$ dB/cm, 输出激光脉冲具有6阶超高斯空间分布和“尖栅栏形”时间波形, 且 $E_{out}|_{r=0} = 3 \text{ J/cm}^2$ 。——: $r = 0$ 处输出脉冲时间波形 $I_{out}(t)$, ——: $r = 0$ 处输入脉冲时间波形 $I_{in}(t)$

Fig. 4 The initial and output temporal pulse profiles of a 3-pass amplifier at $r = 0$. (a) $p = 0.5$, the gain coefficient $g_0 = g_{00}(1 + r^2/4)$ dB/cm, the output pulse has a 6-order super-Gaussian profile in the space domain, a picket-fence type temporal profile in the time domain, and $E_{out}|_{r=0} = 3 \text{ J/cm}^2$; (b) $p = 1$, the gain coefficient $g_0 = g_{00}(1 + r^2/4)$ dB/cm, the output pulse has a 6-order super-Gaussian profile in the space domain, a picket-fence type temporal profile in the time domain, and $E_{out}|_{r=0} = 3 \text{ J/cm}^2$. ——: output temporal pulse profile $I_{out}(t)$ at $r = 0$, ——: initial temporal pulse profile $I_{in}(t)$ at $r = 0$

4 小 结

本文从双程放大器的逆问题入手,用逐次逼近迭代法解决了比较复杂的多程放大器的逆问题。就我们的认识,对 ICF 驱动器中多程放大器的逆问题难于得到解析的结果。虽然,迭代过程的说明比较复杂,但在计算机上是容易完成的。大量数值计算表明,使用这一方法可有效地得出合乎物理要求的多程放大器的初始脉冲时间、空间波形和能量密度。显然,多级放大器可看作是初始各级增益分布已知的多程放大器的特例,因此,我们的计算程序实际上是对多程和多级放大器统一编制的。该程序还用我国激光聚变驱动器的有关设计计算和实验数据作了校验,得到了一致的结果。本文有关工作和所得结果对新一代高功率激光驱动器的设计有参考价值。

致谢 作者感谢与邓锡铭院士、范滇元院士、林尊琪教授和张小民副研究员对本文有关问题所作的十分有益的讨论。

参 考 文 献

- 1 W. H. Lowdermilk, J. E. Murray. The multipass amplifier: Theory and numerical analysis. *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**: 2430
- 2 范滇元, [余文炎]. 高功率多程放大器. *J. Lasers*, 1980, **7**: 1
- 3 B. Lü, B. Zhang. Inverse problem of a laser amplifier. *Opt. Commun.*, 1996, **130**: 279
- 4 张 彬, 吕百达. 高功率激光通过脉冲放大器的变化. *中国激光*, 1996, **A23**(12): 1061~ 1066
- 5 J. K. Lawson, D. R. Speck, S. C. Burkhart *et al.*. Temporal shaping of third-harmonic pulse on the Nova laser system. *Appl. Opt.*, 1992, **31**: 5061

An Inverse Problem of Multistage and Multipass Pulsed-laser Amplifiers

Zhang Bin Lü Baida

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

Abstract By using the pulse-sequence model and the successive iteration method, the inverse problem of multistage and multipass pulsed-laser amplifiers, namely, to find the incident pulse shape and fluence from the given output pulse and multi-stage/multipass amplifier parameters, is studied and simulated numerically in detail.

Key words multistage and multipass pulsed-laser amplifiers, spatial and temporal profiles, inverse problem of laser amplifier, successive iteration method