

同轴型双程放大器的研究

郑玉霞 朱 俭 吕君孝 范滇元

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理实验室, 上海 201800)

摘 要 理论上计算了在多程放大过程中反转粒子数的利用效率、反转粒子数的分布等。计算结果与“神光-Ⅰ”主放大器原型-同轴型双程放大器-实验结果相符合。

关键词 同轴双程放大器, 引出效率, 反转粒子数。

1 引 言

高功率固体钕玻璃激光系统中的主放大器, 是激光能量的主要来源, 它的性能直接决定装置总体技术水平, 其能量转换效率和造价也将直接决定装置的性能价格比。提高装置的总体效率对改善性能价格比有重要作用。为了提高主放大器的储能效率和能量提取效率, 可采用合适的 LC 供电系统, 优化的泵浦腔结构, 适当的 Nd 玻璃片厚度, 掺杂浓度及片数, 多通放大次数, 光路布局等, 其中多通放大系统能够有效地提高系统的效率, 降低系统的造价, 所以, 多通放大技术已广泛运用于强激光系统设计中^[1~6]。

美国的 LLNL 从七十年代就开始研究应用多通放大技术, 建立了一套名为 MALAPROP 的模拟程序来模拟多通放大过程中反转粒子数和增益的变化, 增益饱和效应, 脉冲波形的变化及 B 积分积累等基本问题, 取得了一些有价值的结果^[1]。

为实现大口径的多通放大, 关键在于选择什么样的多通放大构形及相应的单元技术, 以实现多通放大系统的可靠稳定运行。

2 反转粒子数在多程放大中的变化

定义局部引出效率 $\eta(z)$ 和总引出效率 $\bar{\eta}$ ^[2]

$$\eta(z) = [h\nu(n_{z0} - n_z) - \alpha E] / h\nu N_0 \quad (1)$$

$$\bar{\eta} = \iint_s (E_L - E_0) ds / \iint_s \left(\int_0^L h\nu N_0 dz \right) ds \quad (2)$$

其中, n_{z0} 是亚稳态上初始的粒子密度; n_z 是激光束通过后亚稳态上剩余的粒子密度; n_0 是初始反转粒子密度; E_L 、 E_0 分别是输出和输入光能量密度。为了计算初始反转粒子数的利用率, 必须掌握反转粒子密度在放大过程中的变化规律。由文献[2], 在多程放大过程中粒子数的变化规律为:

$$N_0^{(K-1)}(\delta) = \left[\frac{N_0^{(K)}}{2}(1 + e^{-\delta/\tau}) + \frac{S_0^{(K)}}{2}(1 - e^{-\delta/\tau}) \right] e^{-\delta/\tau} + \left[\frac{S_2^{(K)}}{1 + K_2} - \frac{S_1^{(K)}}{1 + K_1} e^{-\delta/\tau} \right] (1 - e^{-\delta/\tau}) - \Delta^{(K)}(A_2 + A_1 e^{-\delta/\tau}) \quad (3)$$

$$S_0^{(K-1)}(\delta) = \left[\frac{N_0^{(K)}}{2}(1 - e^{-\delta/\tau}) + \frac{S_0^{(K)}}{2}(1 + e^{-\delta/\tau}) \right] e^{-\delta/\tau} + \left[\frac{S_2^{(K)}}{1 + K_2} + \frac{S_1^{(K)}}{1 + K_1} e^{-\delta/\tau} \right] (1 - e^{-\delta/\tau}) - \Delta^{(K)}(A_2 - A_1 e^{-\delta/\tau}) \quad (4)$$

$$S_2^{(K+1)}(\delta) = S_2^{(K)} - \Delta^{(K)} \quad (5)$$

$$S_1^{(K+1)}(\delta) = S_1^{(K)} e^{-\delta/\tau} + \Delta^{(K)} e^{-\delta/\tau} = (S_1^{(K)} + \Delta^{(K)}) e^{-\delta/\tau} \quad (6)$$

其中, N_0 为上下工作能级的粒子密度差额; S_0 为上下工作能级的粒子密度总和; S_2 是亚稳态各子能级粒子密度之和; S_1 为终态上各子能级粒子密度之和; $N_0^{(K)}$ 、 $S_0^{(K)}$ 、 $S_1^{(K)}$ 、 $S_2^{(K)}$ 表示 K 轮放大前工作物质中粒子密度的分布, $N_0^{(K+1)}$ 、 $S_0^{(K+1)}$ 、 $S_1^{(K+1)}$ 、 $S_2^{(K+1)}$ 表示 $K+1$ 轮放大前工作物质中粒子密度的分布, δ 为两轮放大之间的时间间隔, T 为子能级热化时间, τ 为终态寿命, $A_1 = (1 + K_1 e^{-\delta/\tau}) / (1 + K_1)$, $A_2 = (1 + K_2 e^{-\delta/\tau}) / (1 + K_2)$, K_1 , K_2 分别表示终态与亚稳态的玻耳兹曼分布系数, 这里 $K_1 = 1.651$; $K_2 = 0.434$; $\Delta^{(K)}$ 是放大过程中因受激跃迁引起的反转粒子密度的减少, 可以由速率方程计算得

$$\Delta^{(K)} = \frac{N_0^{(K)}}{2} [1 - e^{-E^{(K)}/E_s}] \quad (7)$$

$E^{(K)}$ 为 K 次入射光能密度, E_s 为饱和能密度。

运用上面的公式, 对入射能密度为 0.95 J/cm^2 , 小信号增益系数为 0.05 cm^{-1} 进行计算, 结果示于图 1, 从中可以清晰地看到在多通放大过程中亚稳态粒子数、上工作能级粒子密度的变化情况和热化效应对增益系数恢复的影响, 特别当能密度较大时, 一次通过可以把上工作能级的粒子数基本抽空, 在同一次放大过程中, 光束能量越大, 从上工作能级抽取的粒子数越多。

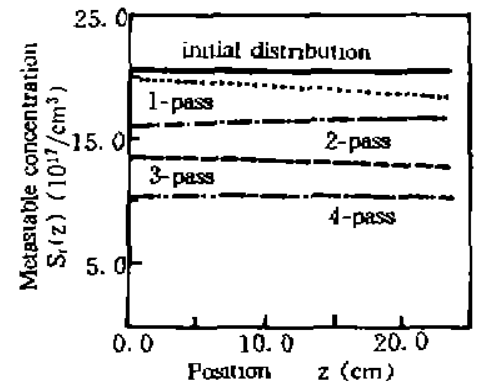


Fig. 1 Metastable concentration versus position along the gain medium under different pass numbers

3 多通放大器的增益

在以下的计算中, 采用脉宽 τ , 约为 4 ns , 能密度 $E = 0.95 \text{ J/cm}^2$ 的高斯脉冲, 激光波长 $\lambda = 1054 \text{ nm}$, 6 片厚度各为 4.0 cm 的磷酸盐 Nd 玻璃片状介质以布儒斯特角放置, 受激辐射截面 $\delta = 3.5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, 初始反转粒子数密度 $N_0 = 1.43 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ (即小信号增益系数 $\beta_0 = 0.05 \text{ cm}^{-1}$), 动态吸收系数 $\alpha = 0.004 \text{ cm}^{-1}$, 多通放大之间的时间间隔 $\delta = 20 \text{ ns}$. 计算对介质内粒子数分布采用局部均匀近似^[3].

现有的单程放大器装置中, 通光一次的平均剩余粒子数在 90% 以上, 利用率极低。

在现有装置基本不变的情况下, 增加通光次数可以充分利用反转粒子数, 能较大提高利用效率。根据上节可以得到多程放大过程中粒子数分布的变化情况, 第一轮增益可表示为

$$G^{(1)}(L) = \frac{E^{(1)}(L)}{E_s^{(1)}} = \frac{E_s}{E_0^{(1)}} \ln [1 + (e^{E_0^{(1)}/E_s} - 1) g_0^{(1)}] e^{-\alpha L} \quad (8)$$

其中 $g_0^{(1)} = \exp(\sigma N_0^{(1)} L)$, 根据(8)式的递推关系, 可得到第 K 轮的增益:

$$G^K(L) = \frac{E_s}{E_0^{(K)}} \ln [1 + (e^{E_0^{(K)}/E_s} - 1) g_0^{(K)}] e^{-\alpha L} \quad (9)$$

$$其中 g_0^{(K)} = \exp \left[\sigma \int_0^L N_2^{(K)} dz \right]$$

图 2 是多程放大过程中总能量增益 $G(K)$ 与通光次数 K 的关系。可见, 当 $K \leq 6$ 时, 总能量增益 $G(K)$ 随 K 增大成倍提高, 平均剩余粒子数也明显下降。当 $K = 7$ 时, $G(K)$ 基本不变, 若 K 继续增大, 由于亚稳态粒子数已接近耗尽, 在动态吸收损耗的作用下, 总能量增益反而减少。在多通放大过程中, 介质中储能的提取效率与多通放大间的时间间隔、初始小信号增益系数及入射激光本身能密度大小之间的关系分别示于图 3, 4, 5。从中可见, 当通光次数低于 3 次时, 大储能密度最有利于储能的利用, 而且, 它对总输出能量的提高特别有效。当通光次数大于 3 次, 由终态能级的热排空效应对抽取效率影响最大, 这种结果是可以预见到的。在实际情况中, 往往通光次数不可能这么大。

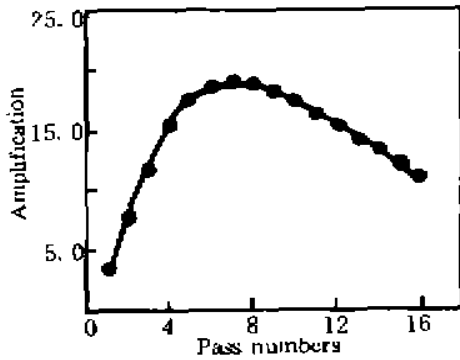


Fig. 2 The total energy gain

度最有利于储能的利用, 而且, 它对总输出能量的提高特别有效。当通光次数大于 3 次, 由终态能级的热排空效应对抽取效率影响最大, 这种结果是可以预见到的。在实际情况中, 往往通光次数不可能这么大。

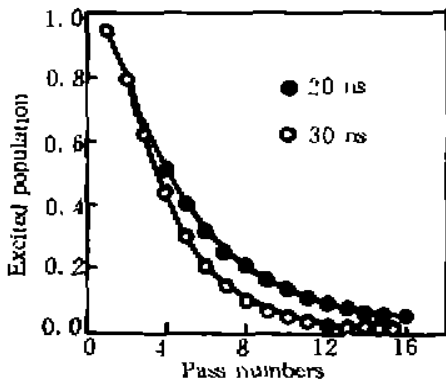


Fig. 3 The average release excited population of metastable vs multipass numbers at different life time of terminal state

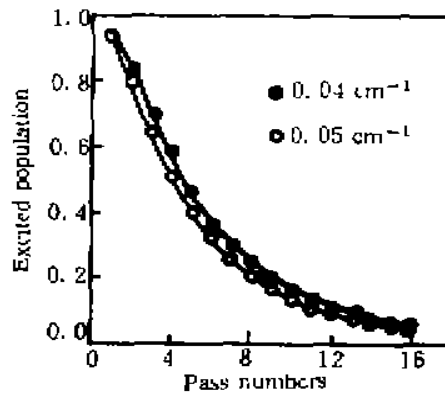


Fig. 4 The average release excited population of metastable vs multipass numbers at different small signal gain coefficient

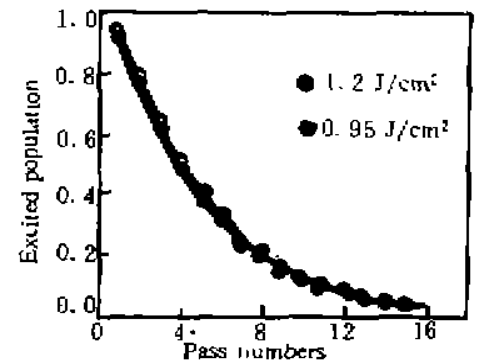


Fig. 5 The average release excited population of metastable vs multipass numbers at different injected energy density

4 同轴型双程放大器的实验研究

作者采用 2×2 组合结构, 成倍地提高泵浦效率。用双程放大方式, 有效地提高能量抽取效率。设计了独特的“同轴型”注入和引出光路, 避开了大口径电光开关的技术难点。

组合式结构如图 6 所示。氙灯和钨玻璃片交叉放置, 钨玻璃片以 2×2 形式组成阵列, 允许四个 $\varnothing 200$ mm 光束并行通过, 纵向片数为 6 片, 按布氏角安放, 每片的标称尺寸为 $200 \times 400 \times 40$ (mm), 氙灯尺寸为 $\varnothing 16 \times 500$ (mm), 中央一列的排列密度大于两侧, 但两侧氙灯外面有反射器。氙灯排列密度的选取, 取决于两个因素: 足够高的泵浦能量和尽可能好的泵浦均匀性。如中央列氙灯总数为 A , 两侧氙灯列总数为 $B + B$, 反射器的有效反射率(计及反射系数和氙灯自吸收系数)为 P , 则要求氙灯的排列满足下列关系:

$$A = B(1 + P)$$

整个器件的总灯数

$$\Sigma = A + 2B = [(3 + P)/(1 + P)]A$$

由于放大器的玻璃片数为偶数，考虑到一部分泵浦光从放大器的两端泄漏出去，使钕玻璃储能的横向分布存在不对称现象，为此特在放大器的两端适当增加了氙灯的数目，使增益系数基本对称。

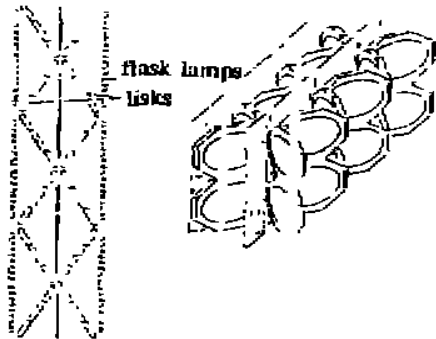


Fig. 6

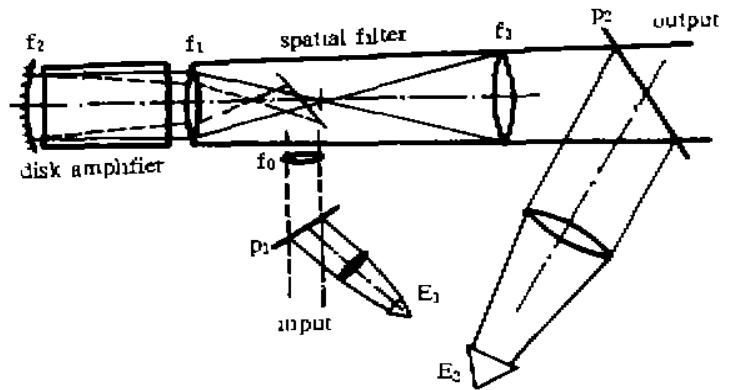


Fig. 7

实验光路如图 7 所示，利用空间滤波器来实现光束的注入和引出。从前级放大器来的激光束经中心开孔的 45°全反射镜 M，以发散光的方式进入片状放大器，经凹面全反射镜 f₂ 反射，以平行光方式第二次通过片状激光器，再经过透镜 f₁ 会聚后穿过滤器小孔，由透镜 f₃ 出射到靶室。

表 1 列出同轴型双程放大器增益的理论值和实验值。

Table 1

number	pumping energy density(J/cm ³)	input laser energy (J)	gain efficient (cm ⁻¹)	calculated gain(time)	experimental gain(time)
1	17.95	70.00	0.0322	4.20	4.16
2	17.95	76.30	0.0322	4.11	4.14
3	22.17	26.04	0.0373	6.00	6.03
4	22.17	71.05	0.0373	5.20	5.35
5	25.62	70.00	0.0411	6.23	6.14
6	25.62	78.40	0.0411	6.03	6.01
7	29.31	71.55	0.0421	6.60	6.57
8	29.31	79.40	0.0421	6.30	6.21
9	29.31	85.68	0.0421	6.01	6.12

实验中发现：

1) 增益偏低，按设计要求，增益系数的实验值应达到 0.047 cm⁻¹。实验中发现，小信号增益系数的提高趋势与氙灯辐射能谱有效吸收带内能量的提高趋势不一致，如图 8 所示。作者认为产生不一致的主要原因是钕玻璃片内产生了寄生振荡。判断实验的结果另文报道。

在放大器的定型中已充分注意到了这个问题，并进行多方面的改进，其中包括将钕玻璃片的包边由硬包边改为软包边，增加包边的厚度，改善包边的均匀性，减小包边的剩余反射率；增加输入光泵能量，将钕玻璃片由 6 片增加到 8 片等。

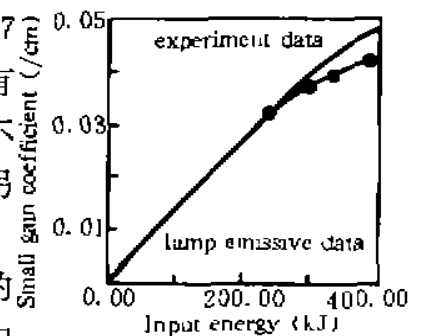


Fig. 8

2) 总体静态透过率偏低, 通过各方面的改进在总体实验中使系统的损耗不大于 30%。

结 论 本文通过理论计算, 讨论了多程放大过程中的增益问题。据此设计了独特的同轴型双程放大器。并讨论了如何减少寄生振荡, 降低系统损耗从而取得较满意的实验结果。

参 考 文 献

- [1] A. J. Glass, W. E. Warren, MALAPROP; light propagation in a nonlinear medium with stochastic perturbations. *Laser Program Annual Report 76*, Lawrence Livermore, CA, UCRL 50021-76, 1977: 2344~2356
- [2] 范滇元, 余文炎, 高功率多程放大器。中国激光, 1980, 7(9): 1~6
- [3] William W. Simmons, John T. Hunt, William E. Warren, Light propagation through large laser system. *IEEE, J. Quant. Electron.*, 1981, QE-17(9): 1727~1743
- [4] Emmett J. L. et al., Future of powerful solid-state laser efficiency increase. *Conference Optics Laser* (Leningrad 13~18 January 1984), Soviet Journ. USSR Academy of Science News. Physical Series, 1984, 40(8): 1467~1477
- [5] Alexandrov V. V. et al., The performance of the light-power Nd: glass amplifier for ICF 20 ECLIM, 1990, January 22~26, Schliersce, FRG.

Study on Coaxial Double-Pass Amplifier

Zheng Yuxia Zhu Jian Lu Junxiao Fan Dianyuan

(National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 18 September 1995; revised 22 November 1995)

Abstract The extraction efficiency and the distribution of population inversion in multi-pass amplifier are calculated theoretically. The calculated results consist with the experimental results coaxial double-pass amplifier of SHENGUANG- II facility results.

Key words double-pass coaxial amplifier, extraction efficiency, population inversion.