

文章编号: 0258-7025(2004)02-0137-05

# 小信号双级染料激光放大器的优化设计

孔祥蕾<sup>1,2</sup>, 罗晓琳<sup>1,2</sup>, 张先焱<sup>1,2</sup>, 裴克梅<sup>1,2</sup>, 张伟<sup>1</sup>, 李海洋<sup>1,2\*</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光谱学实验室, 安徽 合肥 230031; <sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 利用染料激光放大器的横向稳态抽运理论, 研究了小信号双级染料放大器的抽运能量分配以及染料池长度的选取对激光增益的影响。对于其他参量确定的放大系统, 存在着最佳的抽运能量分配比例和最佳的染料池长度的选取方法。通过自编程序的计算, 可方便地找出特定系统染料池长度和抽运能量分配比例的最佳值。

**关键词** 激光技术; 染料激光放大器; 激光增益; 优化设计

中图分类号 TN 248.3 文献标识码 A

## Optimal Design for Small Signal Two-Stage Dye Laser Amplifiers

KONG Xiang-lei<sup>1,2</sup>, LUO Xiao-lin<sup>1,2</sup>, ZHANG Xian-yi<sup>1,2</sup>,  
PEI Ke-mei<sup>1,2</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, LI Hai-yang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Environmental Spectroscopy, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China  
<sup>2</sup>Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

**Abstract** The optimized dye cell length and the partition of pump laser energy between two dye cells in small signal two-stage dye laser amplifiers were numerically analyzed using the transversely-pumped steady-state theory. A computer program was written to find the optimized values of partition of pump laser energy and length of dye cell for a given set of parameters.

**Key words** laser technique; dye laser amplifiers; laser gain; optimal design

## 1 引言

利用 YAG 激光器或铜蒸气激光器作为抽运光源, 对窄线宽的小信号激光进行放大, 可使输出激光在获得高功率的同时仍保持很好的光谱特性。Ganiel 等最初建立了应用于染料激光器和染料放大器的速率方程理论<sup>[1]</sup>, 此后又有较多的工作对此进行了进一步的研究<sup>[2~7]</sup>。但设计者发现将这些结论应用在具体的设计中是很困难的。本文利用稳态条件下同时考虑激光增益和放大的自发辐射(ASE)的速率方程理论, 对小信号双级染料激光放大器的两个染料池的长度和抽运光能量分配比例进行了详细

的研究。利用自编的程序, 分别对具体染料放大器的染料池长度和抽运光能量进行优化设计, 获得了最大的激光增益。利用循环优化的方法可以发现系统的最优设计参量。只需修改相应的参量, 这些方法就可应用于其他小信号染料放大系统的设计中。

## 2 理论

本文考虑的是一个横向抽运的单次通过的小信号双级染料放大系统。下面用到的未加解释的符号将在表 1 中得到说明。采用一维模型<sup>[1~7]</sup>, 设有效抽运区域为一个直径为  $d$ , 长为  $L$  的圆柱状区域, 并

收稿日期 2002-07-16; 收到修改稿日期 2002-09-23

基金项目: 国家自然科学基金(编号 20073042)资助项目。

作者简介: 孔祥蕾(1974—), 男, 安徽广德人, 中国科学院安徽光学精密机械研究所博士研究生, 主要研究方向为激光技术和激光光谱学。E-mail: kongxl@aiofm.ac.cn

\* 通信联系数据: E-mail: hli@aiofm.ac.cn

满足  $d \ll L$  ,且染料池前后端面对 ASE 的有效反射率均为  $r$ 。

如果忽略抽运光由于染料的吸收所引起的能量分布不均匀,认为在整个抽运区域抽运能量是均匀的,并定义  $E_{po}$  为抽运光总能量,则抽运区域内的有效平均抽运能量为

$$E_{pe} = p_e E_{po} (1 - T) / \ln(1/T) \quad (1)$$

式中  $p_e$  为有效抽运因子,  $T$  为抽运光穿过抽运区域的能量透过率,可用下式计算

$$T = \exp(-n\sigma_{01}d) \quad (2)$$

与其他文献不同的是(1)式中引入了  $p_e$ ,它表示实际上打在有效抽运区的能量与总抽运能量之比,其大小由染料池的形状、表面反射率决定。通过对激光输运方程和 ASE 的输运方程的分析,可得到单程通过的染料放大池的增益  $G$  满足的超越方程<sup>[3,4]</sup>

$$\left(1 - \frac{B}{\sqrt{1 + \ln G}}\right) \ln G + \frac{B(1 - r)(G - 1)}{(1 - rG)\sqrt{1 + \ln G}} = \alpha_0 L - \frac{I_{in}}{I_s}(G - 1) \quad (3)$$

其中  $B$  为沿  $z$  轴方向的 ASE 能流系数,可用下式求得

$$B = Q \left[ 1 + \frac{L}{d} - \sqrt{1 + \left(\frac{L}{d}\right)^2} \right] \frac{d}{L} \quad (4)$$

$Q$  表示荧光量子效率,等于  $\tau_\mu/\tau_s$ ,  $\sigma_\mu$ ,  $\sigma_s$  分别为激发态寿命和自发辐射寿命。(3)式中的  $\alpha_0$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) 为小信号增益,  $I_s$  为有效饱和光强。可分别由速率方程求出<sup>[2]</sup>

$$\alpha_0 = \frac{n\sigma_e^{\text{eff}}(\sigma_{01}I_p\tau_s - \sigma_{01}^\lambda/\sigma_e^{\text{eff}})}{1 + \sigma_{01}\tau_s I_p} \quad (5)$$

$$I_s = \frac{1 + \sigma_{01}\tau_s I_p}{\sigma_e^\lambda \tau_s (1 + \sigma_{01}^\lambda/\sigma_e^\lambda)} \quad (6)$$

$\sigma_e^{\text{eff}}$  为信号激光对应的有效发射截面,其大小等于  $\sigma_e^{\text{eff}} = \sigma_e^\lambda - \sigma_{12}$ 。而对于(3)式,如果忽略 ASE,即有  $B = 0$ ,则有

$$\ln G = \alpha_0 L - \frac{I_{in}}{I_s}(G - 1) \quad (7)$$

即为忽略 ASE 时的激光增益表达式。用  $E_{in}$  和  $E_{out}$  分别表示输入信号光与放大后输出光的能量,整个激光放大系统的抽运效率为

$$\eta = \frac{E_{out} - E_{in}}{E_{po}} = \frac{E_{in}(G - 1)}{E_{po}} \quad (8)$$

表 1 设计中使用的各项参量

Table 1 Parameters used in the numerical analysis

| Symbols               | Explanation  | Numerical values                    | Ref.   |
|-----------------------|--|-------------------------------------|--------|
| $\sigma_{01}$         | Ground state absorption cross section for pump laser         | $4.2 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$  | [ 10 ] |
| $\sigma_e^\lambda$    | Effective stimulated emission cross section for signal laser | $2.6 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$  | [ 10 ] |
| $\sigma_{12}$         | Cross section for excited-state absorption                   | $0.91 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ | [ 10 ] |
| $\sigma_{01}^\lambda$ | Ground state absorption cross section for signal laser       | $1.25 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ | [ 10 ] |
| $\tau_s$              | Spontaneous emission life                                    | 5.5 ns                              | [ 1 ]  |
| $Q$                   | Quantum efficiency   | 0.85                                | [ 3 ]  |
| $n$                   | Dye concentration  | $6.0 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$  |        |
| $d$                   | Radius of gain region  | 0.2 cm                              |        |
| $L$                   | Total length of gain region                                  | 6 cm                                |        |
| $r$                   | Reflection coefficient of cell window                        | $2.0 \times 10^{-4}$                |        |
| $\tau_p$              | Duration of pump laser                                       | 10 ns                               |        |
| $\lambda_p$           | Wavelength of pump laser                                     | 532 nm                              |        |
| $\lambda_s$           | Wavelength of signal laser                                   | 570 nm                              |        |
| $E_{po}$              | Energy of pump laser   | 50 mJ/pulse                         |        |
| $E_s$                 | Energy of signal laser                                       | 10 nJ/pulse                         |        |
| $f_p$                 | Frequency of pump laser pulse                                | 20 Hz                               |        |
| $p_e$                 | Effective factor of pump                                     | 0.9                                 |        |

### 3 优化设计

端面反射和饱和增益的限制使得单个染料放大

池不能获得很高的增益<sup>[1,3]</sup>,故一般使用抽运光对多级染料池进行放大,以获得高增益的脉冲放大光<sup>[8,9]</sup>。对于这样的系统,抽运光能量的分配方法

以及染料池的长度选取对增益的影响是很大的。这里在方程(1)~(8)的基础上,对小信号双级染料放大系统中染料池抽运光能量的分配方法以及染料池的长度选取进行了分析。优化放大系统的设计参量,以在其他条件相同时获得最大的增益和转换效率。

### 3.1 参数选择

设抽运光的总能量被均匀分布在总长  $L = 6$  cm,直径  $d = 1$  mm 的有效抽运区域中。选用的染料为 R6G(被放大的信号光的中心波长为 570 nm),选用 YAG 激光的二倍频 532 nm 为抽运光。设计中应用到的各项参量值如表 1 所示。

### 3.2 抽运光能量的分配

在抽运光总能量一定的条件下,放大系统的总增益与两级染料放大池的能量分配比有着重要的关系。自编程序 OPUMP 的目的就在于找出在确定染料池长度和抽运光总能量的条件下存在的最佳能量分配参量,程序的流程如图 1 所示。

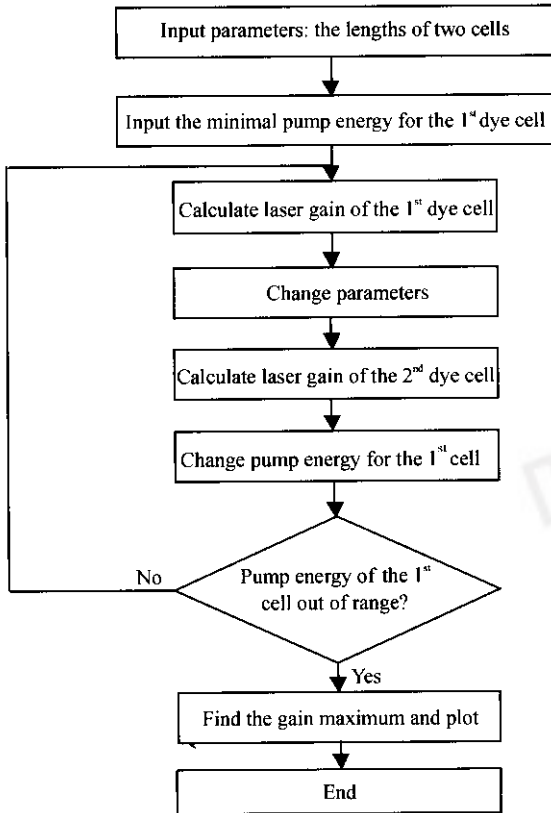


图 1 程序 OPUMP 的流程图

Fig. 1 Flow diagram of program OPUMP

图 2 为当采用表 1 中的参量,并设第 1、2 级染料池的长度分别为 2 cm 和 4 cm,抽运光能量变化

间隔取 0.2 mJ 时的计算结果。可以看出,第一级染料池的抽运光能量对放大系统的总增益有较大的影响,且对于一个确定的染料放大系统,存在一个最佳的抽运光能量分配方法,可使系统获得最大的增益和最高的转换效率。在上面计算的例子中,当第一级染料池的抽运光能量为 8.7 mJ(对应的第 1 级染料池的抽运光能量占总能量的 0.174)时,系统可获得最大增益  $G = 1.367 \times 10^6$ ,对应的转换效率为 27.3%。

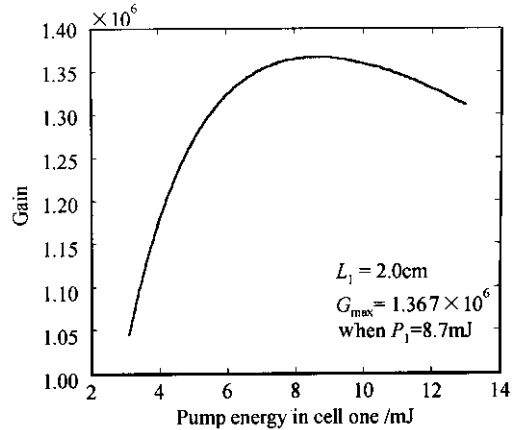


图 2 抽运能量的优化

Fig. 2 Optimal design for the pump energy

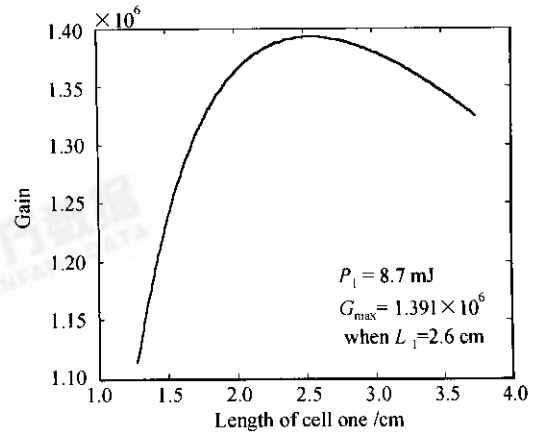


图 3 染料池长度的优化

Fig. 3 Optimal design for the lengths of dye cells

### 3.3 染料池长度的选择

如果确定了总的有效抽运区域的长度以及各级染料池的能量分配,则两级染料池的长度选择也会对增益产生较大的影响。利用自编程序 OLENGTH 就可以找出这种情况下两者之间的关系。程序的设计方法与 OPUMP 相类似。图 3 为利用图 2 的结果,即假定第一级染料池中的抽运能量为 8.7 mJ 时,计算出的第一级染料池的长度与系统增益的关系。其中,长度的计算间隔为 0.2 mm。结果表明,系统的

最大增益为  $G = 1.391 \times 10^6$ , 而此时第一级染料池的长度为 2.6 cm。

### 3.4 优化设计结果

从上面的计算和讨论可知, 对于各级染料池长度确定的放大系统, 存在着最佳的抽运能量分配, 而对于各级抽运能量确定的系统, 可通过选择染料池的长度来得到最大的增益。若将两种方法相结合, 通过迭代的方法, 就可以得到抽运能量分配和长度选择的稳定值, 从而得到系统的最佳设计参数。表 2 即为利用 3.2 节中的例子作为初始值进行迭代的计算结果。

从表 2 可以看出, 随着优化循环的进行, 结果在发生相应的变化, 增益也在逐渐增加。在完成第 5 次计算后, 结果出现收敛。但实际上计算进行到第 2 次左右的时候, 其结果已与最后结果相当接近了。一个值得注意的问题是, 对于其他参量确定的系统, 初值的选取以及优化顺序的选取是否会影响到最后的结果。表 3 为分别选取不同  $L_1$  和  $P_1$  作为初

值的最终优化结果。

可以看出, 表 3 中的最后优化结果是完全相同的。初值选取的种类即优化顺序和初值的大小都对最后的优化结果没有影响。但初值可能会对优化计算所需的次数产生影响, 选取的初值离最后迭代结果相差越远, 所需的计算步骤就越多。Cromwell 等建立的三级放大系统中的前两级放大满足本文中的小信号放大条件, 并采用了相近的参数<sup>[8]</sup>。其中前两级放大池的长度分别为 2 cm 和 3 cm, 利用经验和实验得到的能量分配比为 1:8, 与我们的优化计算结果定性上是一致的。

将其他条件相同时(表 1)采用单级放大池、两个等同的放大池以及分别采用 OPUMP, OLENGTH 和综合优化后的系统增益列于表 4 中。结果清楚地表明了优化设计在两级染料放大系统中所能起到的重要作用。同时也可看出, 在实际的设计中, 用两个程序循环优化的方法, 只需一次就可以获得具有实际应用价值的设计值。

表 2 迭代计算结果

Table 2 Results of iteration

| No. | Program | Initial value   | Optimal result  | Maximum of gain     |
|-----|---------|-----------------|-----------------|---------------------|
| 1   | OPUMP   | $L_1 = 2.0$ cm  | $P_1 = 8.7$ mJ  | $1.367 \times 10^6$ |
| 2   | OLENGTH | $P_1 = 8.7$ mJ  | $L_1 = 2.6$ cm  | $1.391 \times 10^6$ |
| 3   | OPUMP   | $L_1 = 2.6$ cm  | $P_1 = 8.2$ mJ  | $1.392 \times 10^6$ |
| 4   | OLENGTH | $P_1 = 8.2$ mJ  | $L_1 = 2.62$ cm | $1.392 \times 10^6$ |
| 5   | OPUMP   | $L_1 = 2.62$ cm | $P_1 = 8.2$ mJ  | $1.392 \times 10^6$ |

表 3 不同初值对应的优化结果

Table 3 Optimal design results for different initial values

| Initial value  | Optimal result   | Times |
|----------------|--|-------|
| $L_1 = 1.0$ cm | $P_1 = 8.2$ mJ, $L_1 = 2.6$ cm, $G_{\max} = 1.392 \times 10^6$ | 5     |
| $L_1 = 2.0$ cm | $P_1 = 8.2$ mJ, $L_1 = 2.6$ cm, $G_{\max} = 1.392 \times 10^6$ | 5     |
| $L_1 = 2.5$ cm | $P_1 = 8.2$ mJ, $L_1 = 2.6$ cm, $G_{\max} = 1.392 \times 10^6$ | 3     |
| $L_1 = 4.5$ cm | $P_1 = 8.2$ mJ, $L_1 = 2.6$ cm, $G_{\max} = 1.392 \times 10^6$ | 5     |
| $P_1 = 1.5$ mJ | $P_1 = 8.2$ mJ, $L_1 = 2.6$ cm, $G_{\max} = 1.392 \times 10^6$ | 4     |
| $P_1 = 10$ mJ  | $P_1 = 8.2$ mJ, $L_1 = 2.6$ cm, $G_{\max} = 1.392 \times 10^6$ | 4     |
| $P_1 = 40$ mJ  | $P_1 = 8.2$ mJ, $L_1 = 2.6$ cm, $G_{\max} = 1.392 \times 10^6$ | 4     |

表 4 几种条件下的设计结果比较

Table 4 Comparison of laser gains under different kinds of condition

| No. | Condition  | Gain                | Efficiency |
|-----|--|---------------------|------------|
| 1   | Single cell, $P = 50$ mJ, $L = 6$ cm                 | $3.913 \times 10^3$ | 0.8%       |
| 2   | Two cells, $P_1 = P_2 = 25$ mJ, $L_1 = L_2 = 3.0$ cm | $1.474 \times 10^5$ | 19.0%      |
| 3   | $P_1 = P_2 = 25$ mJ, using program OLENGTH           | $9.718 \times 10^5$ | 19.4%      |
| 4   | $L_1 = L_2 = 3.0$ cm, using program OPUMP            | $1.380 \times 10^5$ | 27.6%      |
| 5   | Using OLENGTH and OPUMP for a turn                   | $1.391 \times 10^5$ | 27.8%      |
| 6   | Last optimal results                                 | $1.392 \times 10^5$ | 27.8%      |

## 4 结 论

综上所述,在脉冲激光抽运的小信号两级染料放大系统中,染料池的抽运能量分配以及染料池长度的选取对激光增益的影响是很大的。对于其他参数确定的放大系统,存在着最佳抽运能量分配和染料池长度选取的设计参量。通过自编程序的计算,可分别找出系统长度设计和抽运能量分配的最佳值。这些结果是在考虑到 ASE 对染料激光增益的影响的速率方程理论上得到的。因此,这种优化设计方法可应用于小信号、高增益以及高功率横向抽运的脉冲染料激光放大器的优化设计中。但当入射信号光能量较大时,激发态吸收对增益的影响变大,这种计算方法会带来较大的误差。

### 参 考 文 献

- 1 U. Ganiel, A. Hardy, G. Neumann *et al.*. Amplified spontaneous emission and signal amplification in dye laser systems [ J ]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1975, **QE-11**( 11 ) : 881 ~ 891
- 2 R. Steven Hargrove, Tehmau Kan. High power efficient dye amplifier pumped by copper vapor lasers [ J ]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1980, **QE-16**( 10 ) : 1108 ~ 1113
- 3 Gunter Hang, Martin Munz, Gerd Marowsky. Amplified spontaneous emission ( ASE ) in laser oscillators and amplifiers [ J ]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1983, **QE-19**( 6 ) : 1149 ~ 1159
- 4 Marcelo G. Destro, Jose W. Neri. Small-signal gain and saturation intensity in dye laser amplifiers [ J ]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**( 33 ) : 7007 ~ 7011
- 5 Shen Jinhui, He Huijuan, Liu Yupu *et al.*. Investigation of parameters in a ultrashort pulse dye laser amplifier [ J ]. *Acta Optica Sinica*, 1992, **12**( 7 ) : 616 ~ 620  
沈晋汇, 何慧娟, 刘玉璞等. 超短脉冲染料放大器中的参数研究 [ J ]. *光学学报*, 1992, **12**( 7 ) : 616 ~ 620
- 6 K. Dasgupta, S. Kundu, L. G. Nair. Extraction efficiency of saturated-gain high-power dye laser amplifiers : effect of nonlinear signal absorption [ J ]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**( 12 ) : 1982 ~ 1988
- 7 Chen Risheng, Zhang Zhizhong, Xie Quanxin *et al.*. Physical design of high power pulsed dye laser amplifier [ J ]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**( 7 ) : 815 ~ 819  
陈日升, 张志忠, 谢全新等. 高功率脉冲染料激光放大器物理设计 [ J ]. *光学学报*, 2001, **21**( 7 ) : 815 ~ 819
- 8 E. Cromwell, T. Trickl, Y. T. Lee *et al.*. Ultranarrow bandwidth VUV-XUV laser system [ J ]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1989, **60**( 9 ) : 2888 ~ 2892
- 9 Chi-Kung Ni, A. H. Kung. Pulsed amplification of cw dye laser with undetectable amplified spontaneous emission [ J ]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2000, **71**( 9 ) : 3309 ~ 3312
- 10 Peter R. Hammond. Comparison of experimental and theoretical excited-state spectra for Rhodamine 6G [ J ]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1980, **QE-16**( 11 ) : 1157 ~ 1159