

文章编号 : 0253-2239( 2001 )07-0815-05

# 高功率脉冲染料激光放大器物理设计

陈日升 张志忠 谢全新 张晓卫  
(天津理化工程研究院,天津 300180)

摘要: 从理论研究出发,用激光增益理论推导得到了在平衡状态下忽略染料分子激发态吸收时,高功率脉冲染料激光放大器物理设计的简单方法,同时以铜蒸气激光器双侧抽运的平均输出功率 52.5 W 的脉冲染料激光放大器为例,对其物理尺寸进行了模拟设计。

关键词: 染料激光器;染料激光放大器;物理设计

中图分类号: TN248.3+3 文献标识码: A

## 1 引 言

染料激光器从其发展初期到现在已经在科学和技术领域被广泛采用。染料激光器的激光波长能够覆盖从近红外到紫外很宽的光谱范围,在光通讯、大气传播、受控化学反应等许多研究领域正在发挥着重要的作用。目前国内外许多著名的科研机构都在进行大规模、高平均功率的脉冲染料激光器研制。提高脉冲染料激光器平均输出功率的有效途径是提高染料激光器的转换效率和增加激光放大器。特定的染料在特定的光谱范围内其能量转换效率是不能无限提高的,因此,增加激光放大器成为获得高平均功率染料激光的必然途径。目前国外已经研制成输出功率上百瓦的染料激光放大器<sup>[1]</sup>,而我们国内由于抽运源的限制,目前还没有输出功率在 20 W 以上的染料激光放大器的研究报道。本文主要从理论研究出发,推导了高功率脉冲染料激光放大器物理设计的简单方法,同时以平均输出功率 52.5 W 的脉冲染料激光放大器为例,对其物理尺寸进行了模拟设计。

## 2 脉冲染料激光放大器平衡态近似理论

脉冲染料激光放大器的能级结构和粒子数转运方程是十分复杂的。为了直观地理解染料激光放大器的工作特性,可从理论上进行近似。这种近似的前提是假设非辐射弛豫过程不参与染料激光放大作用以及染料激光放大器单重态粒子数处于平衡状

态。在这种平衡状态下激光染料分子的能级结构如图 1 所示。图中  $n_0$  和  $n_1$  分别为基态  $S_0$  和第一激发态  $S_1$  上的粒子数密度,  $\sigma_{01}$  和  $\sigma_{12}$  分别为基态  $S_0$  和第一激发态  $S_1$  粒子对抽运光的吸收截面 ( $\text{cm}^2$ ),  $\sigma_e$  为受激辐射截面 ( $\text{cm}^2$ ),  $\tau$  为  $S_1$  态粒子荧光寿命 (s),  $\sigma_{01}^l$  和  $\sigma_{12}^l$  分别为注入激光波长下  $S_0 \rightarrow S_1$  和  $S_1 \rightarrow S_2$  的吸收截面 ( $\text{cm}^2$ )。

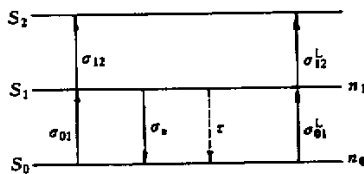


Fig. 1 Simplified molecular energy level diagram in steady state theory

在图 2 所示的脉冲染料激光器的典型实验装置示意图上,抽运激光光束沿染料激光放大器的长度方向 ( $y$ ) 聚焦成一条很细的直线,以提供高能量密度的抽运光。注入激光光束  $I_{in}$  通过染料激光放大器沿与抽运光束垂直相交的方向 ( $x$ ) 传播。抽运光强提供了染料分子从基态向激发态跃迁的能量,第一激发态在注入激光的激励下受激辐射跃迁,这样就产生了注入激光的放大作用。

抽运光沿  $x$  方向的传播规律可由下式描述:

$$\frac{dI_p}{dx} = -n_0\sigma_{01}I_p - n_1\sigma_{12}I_p, \quad (1)$$

注入光强沿  $y$  方向的传播规律可以由下式描述:

$$\frac{dI}{dy} = n_1\sigma_e I - n_0\sigma_{01}^l I - n_1\sigma_{12}^l I. \quad (2)$$

在脉冲激光放大器中,三重态对激光的放大作用不明显。因此在给定光强下,上能级粒子数密度保持平

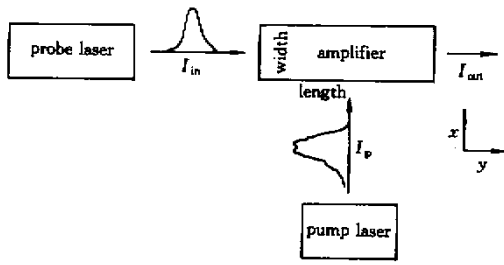


Fig.2 Block diagram of dye laser amplifier

衡,  $n_1$  的时间变化率为:

$$\frac{dn_1}{dt} = n_0\sigma_{01}I_p + n_0\sigma_{01}^l I - n_1\sigma_e I - \frac{n_1}{\tau}. \quad (3)$$

上式忽略了三重态和单重态之间的非辐射跃迁。染料分子的总粒子数密度可以表示为:

$$n = n_0 + n_1, \quad (4)$$

在平衡状态下, 上能级粒子数保持不变, 即

$$\frac{dn_1}{dt} = 0, \quad (5)$$

解(1)式~(5)式可以得到脉冲染料激光放大器中的光子传播方程<sup>[2~5]</sup>:

$$\frac{dI_p}{dx} = \frac{-n\sigma_{01}I_p[1 + I/I_S + R(I_p/I_{PS} + I/I_{LS})]}{1 + I_p/I_{PS} + I/I_S + I/I_{LS}}, \quad (6)$$

$$\frac{dI}{dy} = \frac{n\sigma_{01}I_p[(1 - R_e)I/I_S] - n\sigma_{01}^l K(1 + R_e I/I_S)}{1 + I_p/I_{PS} + I/I_S + I/I_{LS}} \quad (7)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} I_{PS} &= (\sigma_{01}\tau)^{-1}, \\ I_S &= (\sigma_e\tau)^{-1}, \\ I_{LS} &= (\sigma_{01}^l\tau)^{-1}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

分别定义为抽运激光吸收饱和强度、受激辐射激光饱和强度和注入激光吸收饱和强度。而

$$R = \frac{\sigma_{12}}{\sigma_{01}}, \quad R_e = \frac{\sigma_{12}^l}{\sigma_e}. \quad (9)$$

当(6)式和(7)式中的光学参数都已知时, 就可以通过计算得到脉冲染料激光放大器的工作特性。

### 3 双侧抽运脉冲染料激光放大器的物理设计

双侧抽运染料激光放大器与单侧抽运染料激光放大器相比有许多优点。它的物理尺寸的确定要综合考虑以下因素: 注入激光脉冲能量、希望得到的输出激光脉冲能量、可以获得的抽运激光脉冲能量、放大器染料池的光学破坏阈值等。要从理论上精确地

计算染料激光放大器的物理尺寸是十分复杂的, 在实际设计中必需进行必要的假设, 以简化计算过程。

在放大器染料池宽度与长度的比值较小 ( $W/L$  小于  $1/5$ ) 时, 可以假设抽运光在放大器染料池宽度方向  $x$  近似均匀分布, 即  $I_p$  近似为常数。这样(1)式的值近似为零, 于是便可以用下面推导的简单的增益理论来粗略地估算放大器的物理尺寸。

图3所示为双侧横向抽运染料激光放大器的结构形式。在小信号增益理论的推导中, 可以忽略在抽运激光波长和注入激光波长作用下染料分子的激发态吸收, 即  $\sigma_{12}$ 、 $\sigma_{01}^l$  和  $\sigma_{12}^l$  均等于零。于是从(1)式、(2)式和(3)式可以得到的简化模型中, 注入激光强度的传播方程为

$$\frac{dI}{dy} = n_1\sigma_e I, \quad (10)$$

$$\frac{dn_1}{dt} = n_0\sigma_{01}I_p - \frac{n_1}{\tau} - n_1\sigma_e I, \quad (11)$$

$$n = n_0 + n_1. \quad (12)$$

对(10)式进行分离变量, 并沿染料池长度方向( $y$ )积分(在此假设抽运光沿染料池长度和宽度方向均匀分布)得到:

$$\int_{I_{in}}^{I_{out}} \frac{dI}{I} = \int_0^L n_1\sigma_e dy, \quad (13)$$

$$\ln \frac{I_{out}}{I_{in}} = n_1\sigma_e L = G. \quad (14)$$

式中  $G$  为放大器的增益, 如果放大器的级间增益定义为:

$$G_{stage} \equiv \frac{I_{out}}{I_{in}}, \quad (15)$$

那么

$$G = \ln G_{stage}. \quad (16)$$

在平衡状态下 ( $dn_1/dt = 0$ ) 解(10)式、(11)式并把(8)式的  $I_{PS}$ 、 $I_S$  代入后可以得到:

$$n_1 = \frac{nI_p/I_{PS}}{1 + I_p/I_{PS} + I/I_S}. \quad (17)$$

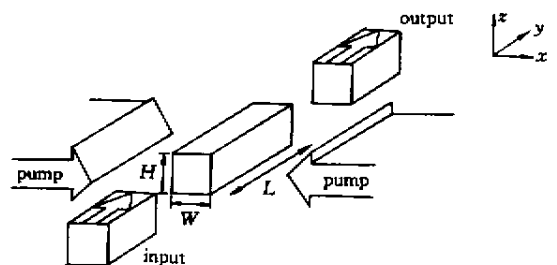


Fig.3 Schematic diagram of a double-sided transversely pumped dye amplifier

把  $n_1$  的表达式代入(10)式,并沿染料池长度方向积分后可以得到下面的表达式:

$$I_s \left( 1 + \frac{I_p}{I_{ps}} \right) \ln \frac{I_{out}}{I_{in}} + (I_{out} - I_{in}) = n\sigma_e L I_s \frac{I_p}{I_{ps}}. \quad (18)$$

把(17)式代入(14)式可以得到  $G$  的表达式:

$$G = \frac{n\sigma_e L I_p / I_{ps}}{1 + I_p / I_{ps} + I / I_s}. \quad (19)$$

当上能级粒子数密度等于总粒子数密度( $n_1 = n$ )时,在增益介质中将获得最大的增益。最大增益可以由(14)式定义为:

$$G_M = n\sigma_e L. \quad (20)$$

把(20)式代入(19)式可以得到由最大增益值表示的增益:

$$G = \frac{G_M I_p / I_{ps}}{1 + I_p / I_{ps} + I / I_s}. \quad (21)$$

上式中当  $I \rightarrow 0$  时得到放大器的小信号增益,即

$$G_0 = \frac{G_M I_p / I_{ps}}{1 + I_p / I_{ps}}. \quad (22)$$

上式经过变换后得到:

$$\varphi = \frac{I_p}{I_{ps}} = \frac{G_0}{G_M - G_0}, \quad (23)$$

把(23)式代入(18)式后可以得到:

$$\ln \frac{\varphi_{out}}{\varphi_{in}} + \left( 1 - \frac{G_0}{G_M} \right) (\varphi_{out} - \varphi_{in}) = G_0, \quad (24)$$

在此

$$\varphi_{out} = \frac{I_{out}}{I_s}, \quad \varphi_{in} = \frac{I_{in}}{I_s}. \quad (25)$$

从(22)式可以看到,  $G_0$  与  $G_M$  的比值只决定于抽运光的强度,这个比值可以定义为:

$$R_G = \frac{G_0}{G_M} = \frac{I_p / I_{ps}}{1 + I_p / I_{ps}}, \quad (26)$$

于是(24)式可以变换为<sup>[2]</sup>:

$$\ln \frac{\varphi_{out}}{\varphi_{in}} + (1 - R_G) (\varphi_{out} - \varphi_{in}) = G_0. \quad (27)$$

我们在这里之所以推导出小信号增益系数的表达式,是因为小信号增益系数与放大器的参数设计有关,而增益系数则与放大器的参数设计无关。

现在考虑利用小信号增益系数的表达式设计一个给定级间增益值的放大器。抽运源选择铜蒸气激光器(CVL),抽运激光波长为 511 nm,脉冲重复频率为 6 kHz,脉冲宽度(FWHM)为 40 ns,放大器的激光染料选 Rh6G。设注入激光的脉冲能量为 0.175 mJ,即平均功率为 1.05 W,希望得到的输出激光脉冲能量设为 8.75 mJ,即平均功率为 52.5 W,

这样放大器级间增益系数为 50。由于染料激光放大器的染料池材料为石英,石英材料的脉冲激光破坏阈值通常为 20 MW/cm<sup>2</sup> 左右。为了防止激光窗口的光学损伤,所设计的染料激光放大器输出激光脉冲峰值强度应小于 20 MW/cm<sup>2</sup><sup>[2,6]</sup>。这里取  $I_{out} = 20 \text{ MW/cm}^2$ ,而输出染料激光的脉冲峰值强度可以用下面的计算公式表示:

$$I = \frac{E_L}{\Delta t_L A_{end}}, \quad (28)$$

式中  $E_L$  为输出染料激光的脉冲能量,即 8.75 mJ,  $A_{end}$  为注入激光的横截面积,在此认为输出激光的横截面积等于放大器染料池的端面面积( $W \times H$ ),  $\Delta t_L$  为染料激光的脉冲宽度(FWHM),在这里我们取 35 ns。

由(28)式可以得到放大器的端面面积为:

$$A_{end} = \frac{8.75 \text{ mJ}}{35 \text{ ns}} \frac{1}{20 \text{ MW/cm}^2} = 1.25 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 = 1.25 \text{ mm}^2.$$

如果把染料池端面设计为等边矩形,即  $W = H$ ,那么染料池的宽度和高度分别为:

$$W = H = 1.12 \text{ mm}.$$

同样利用(28)式可以计算得到注入激光的脉冲峰值强度:

$$I_{in} = \frac{0.175 \text{ mJ}}{35 \text{ ns} \times 1.25 \times 10^{-2} \text{ cm}^2} = 0.4 \text{ MW/cm}^2.$$

下面来估算染料溶液中染料分子的粒子数密度,也就是染料溶液的浓度。根据比尔斯经验法则(Beers Law),抽运激光在经过染料放大器的染料池沿  $x$  方向传播时,其光强呈指数规律下降<sup>[8]</sup>,即:

$$I_p = I_{(in)} \exp(-n\sigma_{01} x), \quad (29)$$

式中  $I_{(in)}$  为抽运光的入射光强,  $n$  为染料分子粒子数密度,  $x$  为抽运光在染料池中的传输距离。比尔斯法则认为,抽运光经过染料池后,其强度约下降为入射时的 30%,也就是:

$$\frac{I_{(out)}}{I_{(in)}} = \exp(-n\sigma_{01} W) = 0.3,$$

将表 1 中的参数值  $\sigma_{01}$  代入上式,计算后得到染料分子的粒子数密度为:

$$n = 6.98 \times 10^{16} / \text{cm}^3.$$

于是染料溶液的浓度为:

$$N = \frac{n}{N_A} = \frac{6.98 \times 10^{16} / \text{cm}^3}{6.023 \times 10^{23} / \text{mol}} = 1.16 \times 10^{-4} \text{ mol/L}.$$

式中  $N_A$  为阿伏伽德罗常数。

Table 1. Optical parameters of a CVL pumped laser dye (Rh6G)

$\lambda$ (pump) = 511 nm	$\lambda$ (emission) = 572 nm
$\sigma_{01} = 1.54 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$	$\sigma_e = 1.86 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$
$\tau = 4.8 \text{ ns}$	
$I_{PS} = 0.53 \text{ MW/cm}^2$	$I_S = 0.39 \text{ MW/cm}^2$

综合考虑染料池的光学破坏阈值以及染料分子的光化学稳定性,要求从放大器两侧分别注入的抽运激光脉冲峰值强度  $I_P$  低于  $5 \text{ MW/cm}^2$  [21]。取  $I_P = 5 \text{ MW/cm}^2$ ,  $I_{PS} = 0.53 \text{ MW/cm}^2$  (参见表 1) 代入 (26) 式后,可以计算得到:

$$R_C = 0.904.$$

把表 1 中的  $I_S$  值代入 (25) 式,并把  $R_C$  的值代入 (27) 式,计算得到  $G_0 = 8.74$ 。由 (26) 式可以计算得到:  $G_M = G_0 / R_C = 9.67$ 。

把  $G_M = 9.67$  代入 (20) 式后可以解得:

$$L = \frac{G_M}{n\sigma_e} = \frac{9.67}{6.98 \times 10^{16} \times 1.86 \times 10^{-16}} = 0.745 \text{ cm} = 7.45 \text{ mm}.$$

如果在增益理论的推导中不忽略在注入激光波长和抽运激光波长下染料分子的激发态吸收,即图 1 中  $\sigma_{12}$ 、 $\sigma_{01}^I$  和  $\sigma_{12}^I$  均大于零,那么计算所得到的染料池长度  $L$  值将有所加大。

至此,已经计算得到了平均输出功率为  $52.5 \text{ W}$  的脉冲染料激光放大器染料池的物理尺寸为:

$$1.12 \text{ mm} \times 1.12 \text{ mm} \times 7.45 \text{ mm}.$$

为了更为精确地验证所设计的染料激光放大器的工作特性,把以上得到的放大器物理参数代入脉冲染料激光放大器平衡态近似理论公式 (6) (7),用迭代的方法在计算机上进行数值计算,得到如图 4 所示的关系曲线。在图 4 中,当  $I_{in} = 0.4 \text{ MW/cm}^2$  时,  $I_{out} = 20.2 \text{ MW/cm}^2$ ,这个结果与我们最初设计的值非常一致。

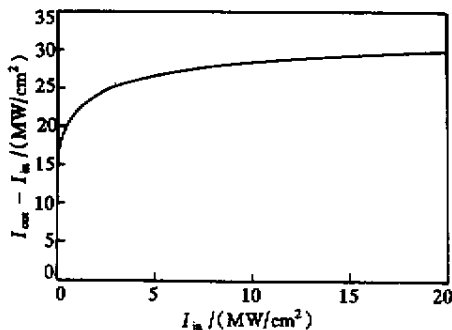


Fig. 4 Probe laser extraction intensity vs. probe laser input intensity for the designed amplifier

现在估算所设计的染料激光放大器所需要的抽运激光的能量。

染料池的侧面积  $A_{side} = L \times H = 8.344 \text{ mm}^2$ , 放大器每一侧所需要的抽运激光脉冲能量为:

$$E_P = I_P \Delta t_P A_{side} =$$

$$5 \text{ MW/cm}^2 \times 40 \text{ ns} \times 8.344 \text{ mm}^2 = 16.7 \text{ mJ}.$$

在双侧抽运条件下,需要铜蒸气激光器的抽运总功率为:

$$P_{\text{pump}} = 2 \times 16.7 \text{ mJ} \times 6 \times 10^3 \text{ Hz} = 200.4 \text{ W}.$$

我们所设计的染料激光放大器的光-光转换效率为:

$$\eta = \frac{P_{\text{out}} - P_{\text{in}}}{P_{\text{pump}}} = \frac{52.5 \text{ W} - 1.05 \text{ W}}{200.4 \text{ W}} = 25.7\%.$$

结论 以上经过理论推导得到了在平衡状态下忽略激发态吸收时,脉冲染料激光放大器物理设计的简单方法。用该方法对平均输出功率为  $52.5 \text{ W}$  的染料激光放大器进行了模拟设计。这种模拟设计的方法适合于小信号、大增益、高功率横向抽运脉冲染料激光放大器的物理设计。我们所推导的设计方法在理论上进行了必要的简化,高功率脉冲染料激光放大器的设计还必须综合考虑抽运源种类、染料种类、染料溶剂种类、染料循环系统、抽运激光以及染料激光的光束质量等因素。但是所得到的方法为高功率脉冲染料激光放大器的物理设计提供了可靠的理论参考。

## 参 考 文 献

- [1] Hackel R P, Warner B E. The copper-pumped dye laser system at Lawrence Livermore National Laboratory. *Proc. SPIE*, 1993, **1859**:121 ~ 129
- [2] Duarte F J. *High-Power Dye Lasers*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1991. 45 ~ 89
- [3] Hargrove R S, Kan T. High power efficient dye amplifier pumped by copper vapor lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1980, **QE-16**(10):1108 ~ 1113
- [4] Lavi S, Amit M. High-repetition-rate high-power variable-bandwidth dye laser. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(13):1905 ~ 1909
- [5] Dasgupta K, Nair L G. Effect of excited-state absorption at signal wavelength in pulsed-dye-laser amplifiers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, **QE-26**(1):189 ~ 192
- [6] Singh S, Dasgupta K. High power high repetition rate copper vapor pumped dye laser. *Opt. Engng.*, 1994, **33**(6):1894 ~ 1903
- [7] Dasgupta K, Kundu S, Nair L G. Extraction efficiency of saturated-gain high-power dye laser amplifiers: Effect of nonlinear signal absorption. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(12):1982 ~ 1988

[ 8 ] Brackmann U. *Laser-Grade Dyes*. Lambda physik GmbH, 1986

## Physical Design of High Power Pulsed Dye Laser Amplifier

Chen Risheng Zhang Zhizhong Xie Quanxin Zhang Xiaowei

( *Institute of Physical and Chemical Engineering, Tianjin 300180* )

( Received 3 April 2000 ; revised 26 June 2000 )

**Abstract:** A simple method of physical design for high power pulsed dye laser amplifier is established based on the gain theory of dye laser steady state. A 52.5 W mean power pulsed dye laser amplifier double sides pumped by copper vapor laser ( CVL ) has been designed by this method and the physical parameters of the amplifier are given.

**Key words:** dye laser ; dye laser amplifier ; physical design