

CVL 横向泵浦的染料激光放大器中泵浦光纵向分布对效率的影响

张立原 季茂力 徐向东 沈婷婷

(核工业理化工程研究院激光室, 天津 300180)

提 要

本文建立了一套较为全面地描述铜蒸汽激光器横向泵浦的染料激光放大器中各种效应的速率方程. 首次计算、分析了泵浦光纵向分布在不同输入信号下对转换效率的影响, 并且讨论了所得结果对于设计和改进染料激光放大器的理论指导意义.

关键词 铜蒸汽激光器(CVL), 速率方程, 转换效率.

1 引 言

染料激光器结构大多为振荡-放大链结构, 这是由于这一结构既可保证输出光具有较高的光谱特性, 又可保证输出光有足够高的功率^[1,2]. 描述染料激光放大器较完善的速率方程最先由 Ganiel 提出, 随后很多作者针对染料激光放大器的各种工作条件进行了大量的理论和实验研究^[4~11]. Hargrove 等^[4]完成了高功率饱和状态下, 铜蒸汽激光器(CVL)泵浦的染料激光放大器的研究, 其中的模型没有考虑放大的受激辐射(ASE)的影响. Namba 等^[5]仍采用 Ganiel 的速率方程, 研究 CVL 泵浦的染料激光放大器在小信号输入情况下的运转特性. Hnilo 等^[7]对高峰值功率短脉冲泵浦的染料激光放大器中的 ASE 影响进行了更加全面的考虑. Dasgupta 和 Nair^[10]则主要讨论了染料激光放大器中高激发态吸收的影响. 在所有上述文献中, 均认为泵浦光在染料池上沿染料光方向的分布是均匀充满的. 但在实际中, 特别是在激光同位素分离研究中, 随着 CVL 输出功率的提高, 染料池的纵向尺寸也在增加, 泵浦光在染料池纵向上的分布均匀性也越来越难保证. 从另一方面看, 工程研究中, 大功率 CVL 系统的热透镜效应及长距离传输的远场效应, 都可能引起泵浦光在染料池上的类高斯分布. 此外, 从染料池工程设计要求上看, 有时也需要染料池两端有一部分非泵浦区. 针对这些情况, 就需要对泵浦光在染料池上的纵向分布及其对放大器效率的影响作深入的研究. 本文以 Ganiel 的速率方程为基础, 采用了 Hnilo 提出的 ASE 模型, 并考虑了高激发态吸收效应, 建立了一套完整的描述 CVL 横向泵浦染料激光放大器的模型, 针对几种实际中出现的和理想的 CVL 纵向分布进行了理论计算, 得出了较好的结果, 对于改进和设计染料激光放大器系统具有重要的指导意义.

2 理论模型

CVL 横向泵浦的染料池中典型的能级图如图 1 所示. 在这个能级模型中, 几个不重要的效应已被忽略^[4]. 首先是三重态自吸收效应, 这是由于 CVL 脉宽(30~50 ns)远远小于单重态与三重态之间的系际交叉时间常数 k_{st}^{-1} (~300 ns)^[3]. 第二是高激发态上的集居数 N_2 近似为零. 这是由于第二激发态向第一激发态的无辐射弛豫时间 ($\tau_{21} \sim 10^{-12}$ s) 远远小于 S_1 态的寿命. 值得注意的是, 虽然第一激发态的吸收过程不改变 N_1 分布, 但却是染料激光的一种损耗, 这在速率方程中可以看出. 第三项忽略的是泵浦光的受激辐射 ($\sigma_e(\lambda_p) \approx 0$). 这种近似在染料的调谐范围内都是成立的.

放大器结构如图 2(a) 所示, 泵浦光 $I_p(x)$ 沿 y, z 方向的分布认为是均匀的, 激活体积认为是一个长为 L 的圆柱体, 直径($2r$) 由泵浦光衰减到 e^{-1} 的穿透深度决定^[4]. $I^+(x, t, \lambda)$ 和 $I^-(x, t, \lambda)$ 分别表示沿 x 正负方向传播的染料光. $I^+(x, t, \lambda)$ 即包括信号光, 也包括 ASE. $I^-(x, t, \lambda)$ 只包括 ASE. 由此, 可写出速率方程:

$$\frac{\partial N_1(x, t)}{\partial t} = I_p(x)\sigma_{01}(\lambda)N_0(x, t) - \tau_1^{-1}N_1(x, t) - N_1(x, t) \int \sigma_e(\lambda)[I^+(x, t, \lambda) + I^-(x, t, \lambda)]d\lambda + N_0(x, t) \int \sigma_{01}(\lambda)[I^+(x, t, \lambda) + I^-(x, t, \lambda)]d\lambda \quad (1)$$

$$N_0(x, t) + N_1(x, t) = N \quad (2)$$

$$\frac{\eta}{c} \frac{\partial I^\pm(x, t, \lambda)}{\partial t} \pm \frac{\partial I^\pm(x, t, \lambda)}{\partial x} = N_1(x, t)\sigma_e(\lambda)I^\pm(x, t, \lambda) - \sigma_{01}(\lambda)N_0(x, t)I^\pm(x, t, \lambda) - N_1(x, t)\sigma_{12}(\lambda)I^\pm(x, t, \lambda) + \tau^{-1}N_1(x, t)E(\lambda)g^\pm(x, x') \quad (3)$$

式中 N_0, N_1 分别为基态和第一激发态的集居数. N 为总染料分子密度, $\sigma_{01}, \sigma_e, \sigma_{12}$ 分别为基态与第一激发表态的受激吸收、受激辐射, 以及第一激发表态向第二激发态的受激吸收截面. $g^\pm(x, x')$ 为 ASE 几何因子. $g^\pm(x, x')$ 的计算不是采用增益区两个端面所决定的立体角^[3], 而是采用更为精确的模型^[7], 即每一点所接收到的其他点的 ASE 由这一点横截面对其他各点所张的立体角所决定, 如图 2(b) 所示.

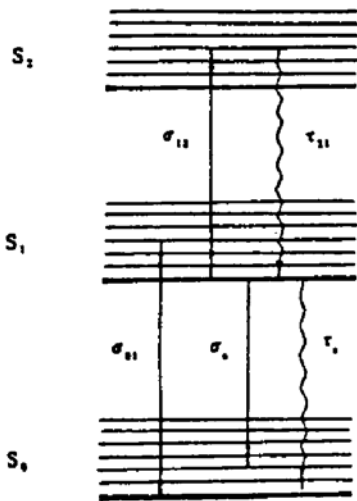


Fig. 1 Schematic energy level and transition diagram of dye molecules for CVL pumped amplifier. S_0, S_1 and S_2 are the ground, first excited and second excited singlet states respectively

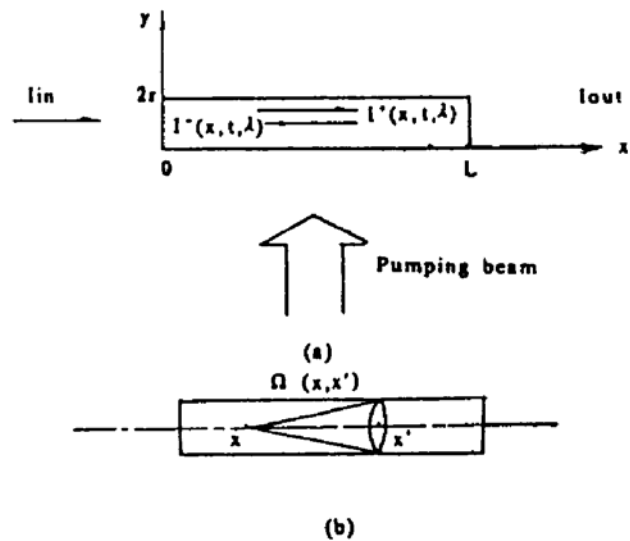


Fig. 2 Model of dye amplifier transversely pumped by CVL (a) geometry model (b) ASE model. The fraction of spontaneous emission from x' that contributes to the ASE in x is that emitted within $\Omega(x, x')$, so geometry factor $g(x, x') = \Omega(x, x')/4\pi$

在具体计算中,采用了如下处理.

1) 由于 ASE 中包含了许多光谱成份,这意味着上述速率方程由许多方程耦合在一起.为简单起见,作者将 ASE 等效为一个频率,其各种截面与峰值近似相等,这种近似在长增益区及 ASE 光谱变窄明显的横向泵浦染料激光放大器中是成立的.

2) 速率方程的解析解是不存在的,为此将增益区离散化加以计算,各能级粒子数分布精度控制在总粒子密度的万分之一,这时输出结果十分稳定.

3) 由于 CVL 脉宽远大于染料第一激发态寿命(~ 4 ns),因此,放大器中很容易达到平衡态.为避免脉冲形状引起的计算困难,作者采用了准稳态方法解上述方程组,这是一种折衷的处理方法,因为在引入 ASE 精确的模式后,需要大容量计算机进行复杂计算,本模型采用准稳态后,又引回含时项,通过调节数学意义上的折射率,加速收敛过程,这样既不影响对染料激光器的效率分析,又使计算简单而迅速.

4) 对各种线型进行了归一化处理,使染料池上的泵浦光功率不变.

3 计算结果与分析

在已发表的有关横向泵浦的染料激光放大器的文献中,一般将泵浦光在染料池上的纵向分布视为充满均匀分布.作者利用上述理论模型,研究了纵向分布为不充满均匀分布,高斯分布,及线性分布在不同信号强度下对放大器效率的影响.

Table 1 Parameter values in the calculation

parameters	numerical values	reference
pumping photon flux, I_0	$8.6 \times 10^{22}/s$	
stimulated-emission cross section, σ_e	$1.76 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$	[4]
absorption cross section, σ_{01}	$1.66 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$	[4]
excited-state absorption cross section, σ_{12}	$3.1 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$	[9]
life time of laser upper level, τ_e	$4.8 \times 10^{-9} \text{ s}$	[4]
density of dye moleculars, N	$1.8 \times 10^{17}/\text{cm}^3$	
radius of excited region, r	0.33 mm	
length of dye cell, L	2 cm	
signal photon flux, $I(0,0,\lambda_1)$	a: $1.1 \times 10^{16}/s$ b: $1.1 \times 10^{17}/s$ c: $1.1 \times 10^{18}/s$ d: $1.1 \times 10^{19}/s$ e: $1.1 \times 10^{20}/s$ f: $1.1 \times 10^{21}/s$ g: $1.1 \times 10^{22}/s$ h: $1.1 \times 10^{23}/s$	
saturation flux, I_s	$2.2 \times 10^{21}/s$	

在准稳态计算中,取 CVL-20(上海光机所制造)10 W 的绿光峰值功率为泵浦功率, Rh6G 为激光染料.为了下述各种分布的计算和讨论简单起见,定义均匀充满分布时的泵浦光光子密度为 $I_0 = I_0 / (L \cdot 2r)$,染料池上某一点泵浦光光子密度为 $I_p(x)$,及饱和光强为 I_s [4]. 相应各参数值见表 1.

3.1 不充满均匀分布

不充满均匀分布原理图见图 3(a),其线型函数为:

$$I_p(x) = \begin{cases} \frac{I_0 \cdot L}{(L - K)}; & |x - \frac{L}{2}| \leq \frac{K}{2} \\ 0; & |x - \frac{L}{2}| > \frac{K}{2} \end{cases}$$

式中 K 为不充满长度,取值范围为 $L/24 \sim L$. 图 3(b)、图 3(c)是计算结果.从图 3(b)中 d, e, f, g 曲线变化趋势可以看出,泵浦光不充满对转换效率的影响随着信号光的增强而减弱,并且当信号光接近饱和光强 I_s 时,泵浦光不充满对效率的影响将基本消失.当信号光超过饱和光强时(h),由于上能态及下能态的吸收增大,转换效率反而下降.

从图 3(c)中可以看出,泵浦光不充满对弱信号的影响很大,转换效率有几个数量级的变化.

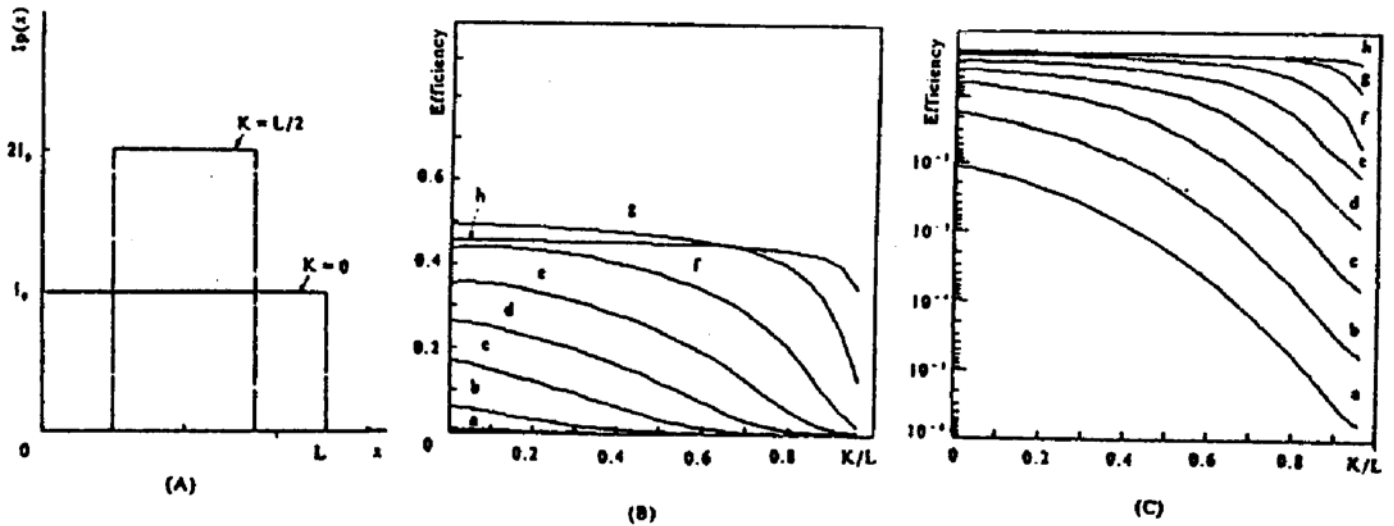


Fig. 3 Calculated results on the condition of uniform and part pumping longitudinal distribution of pumping beam on the dye cell. (a) schematic diagram of the pumping beam longitudinal distribution (b) results in cartesian coordinate (c) results in logarithmic coordinate

3.2 高斯分布

作者认为高斯线型的泵浦光在染料池纵向上是对称分布的,如图 4(a)所示其中 $K > 0$ 表示中上凸, $K < 0$ 表示中凹. 这两种情况在 CVL 泵浦中是可能出现的. 线型函数为:

$$I_p(x) = \begin{cases} K_0/K \cdot I_0 \exp \left[-\left(\frac{1}{2K^2}\right)(x - (L/2))^2 \right]; & K > 0 \\ 2I_0 - (K_0/K) \cdot I_0 \exp \left[-\left(\frac{1}{2K^2}\right)(x - (L/2))^2 \right]; & K < 0 \\ I_0; & K = 0 \end{cases}$$

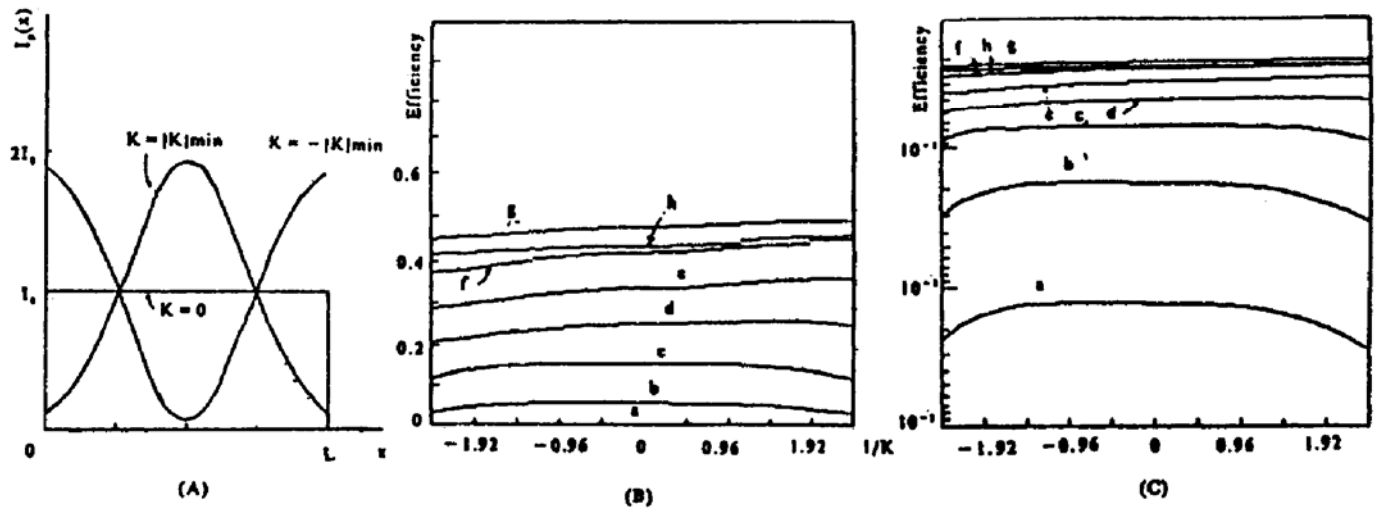


Fig. 4 Calculated results on the condition of Gauss functional longitudinal distribution of pumping beam on the dye cell (a) schematic diagram of the pumping beam longitudinal distribution (b) results in Cartesian coordinate (c) results in logarithmic coordinate

式中 K_0 为归一化因子, K 为分布常数. $|x - (L/2)| \leq L/2$. 从图 4(b)、图 4(c)的结果中可以看出,高斯分布程度的不同,不象不充满均匀分布那样强烈地影响放大器效率. 这是因为高斯分布泵浦的放大器中没有强烈的吸收区,因而效率的变化主要由不同分布下 ASE 的大小决定. 从 d, e, f 中明显地看到,在高斯正分布下效率有明显提高,这是由于在这种情况下更利于抑制 ASE,提高放大器的存储能,这一点与文献[7]中的结论一致. 在饱和区 (g, h) 和非饱和区

(*a, b, c*), 高斯分布对放大器效率的影响不大. 曲线 *a, b, c* 两端效率的下降, 主要是由于高增益区太短, 存储能没有被信号取出造成.

3.3 线性分布

线性分布如图 5(a)所示, 线型函数为:

$$I_p(x) = I_0 + K \cdot [x - (L/2)]; \quad |K| \leq (2I_0/L)$$

线性分布是一种理想分布, 实际中不多见. 定性地说, 对于一定的染料信号光, 总存在一个泵浦光的最佳分布使转换效率最大. 对于饱和和欠饱和放大, 线性分布是十分有利的. 因为此时信号光随 x 轴逐渐增加, 而饱和光强与泵浦光强呈线性关系^[4]. 因此, 为避免过饱和放大, 就要求泵浦光随 x 逐渐增加. 从图 5(b)、图 5(c)看出, 这种定性分析与计算结果是完全一致的. (a) 中信号光太弱, 远小于饱和光强 I_s , 因而线性分布无明显效果. (b), (c) 中明显有最佳线性分布. (d), (e) 中信号光接近 I_s , 最佳分布斜率增大且更为明显. (f) 已是饱和区, 正线性分布效率仍然略高于负线性分布. (g)(h) 为过饱和放大, 负线性分布效率略高, 是由于上能级吸收在负线性分布下较小, 而在正线性分布区较大.

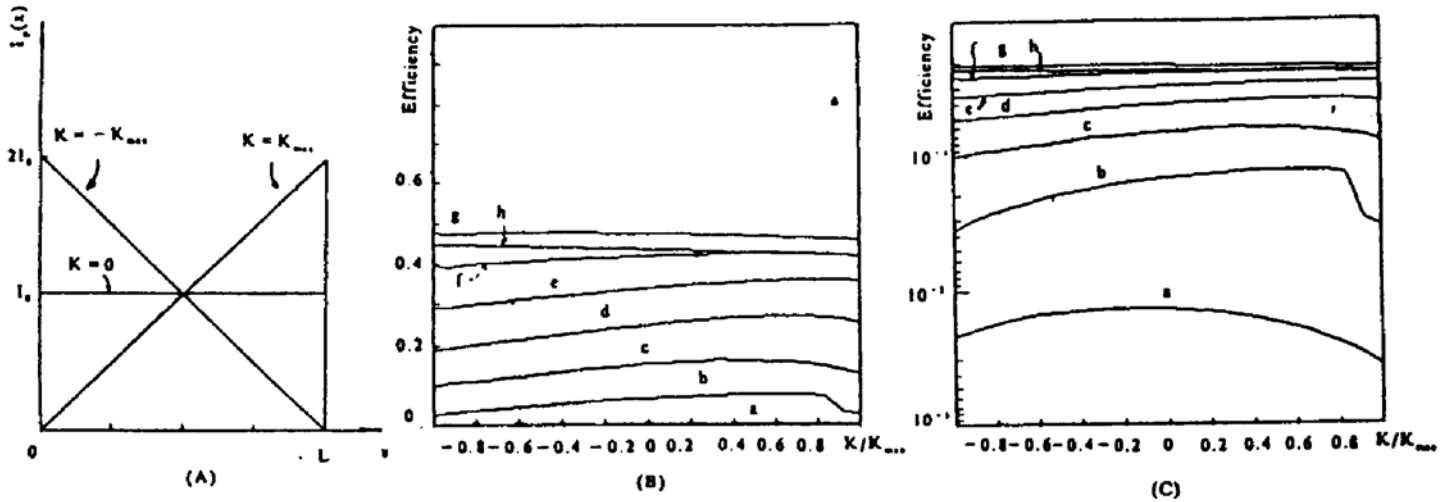


Fig. 5 Calculated results on the condition of linear functional longitudinal distribution of pumping beam on the dye cell (a) schematic diagram of the pumping beam longitudinal distribution (b) results in cartesian coordinate (c) results in logarithmic coordinate

4 结 论

本文建立了一套较为全面地描述 CVL 横向泵浦的染料激光放大器中各种效应的速率方程, 找到了简明的数值解法, 并用这个模型计算了在几种不同输入信号和几种不同的泵浦光纵向分布条件下, 放大器的转换效率.

从上述计算可以看出, 大功率放大器中应注意信号光与泵浦光的匹配, 避免过饱和放大引起的上能级吸收加剧, 效率降低. 欠饱和放大器中应注意泵浦光纵向分布形式, 使效率最佳. 小信号放大中更应注意染料池的均匀充满分布, 尽可能多地取出染料池中的存贮能. 这三组曲线既适用于小信号放大也适用于欠饱和及饱和放大. 对于染料激光放大器的改进设计具有重要的理论指导意义. 此外, 利用这个模型针对染料激光放大器中的其它问题(如光谱纯度、脉冲时域变化), 对某些参数精细化可进行深入的研究.

本文得到了徐品方、俞沛增教授的指导与帮助. 得益于与王小伟、张降元等同志的讨论. 同

时还得到了朱明、董丽萍同志在计算机方面的帮助,及孔九军、席学武在文献方面的帮助,在此一并表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- [1] P. T. Greenland, D. N. Travis, D. J. H. Wort, Resonant ionization polarization spectroscopy in uranium. *J. Phys. B; At. Mol. Opt. Phys.*, 1990, **23**: 2945
- [2] I. L. Bass, E. S. Bliss, R. E. Bonanno *et al.*, High-power performance of a copper-laser-pumped dye master-oscillator-power-amplifier chain. *CLEO' 91*, CThH5, 392
- [3] U. Ganiel, A. Hardy, G. Neumann, *et al.*, Amplified spontaneous emission and signal amplification in dye-laser system. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1975, **QE-11**(11): 881
- [4] R. Steven Hargrove, Tehmau Kan, High power efficient dye amplifier pumped by copper vapor laser. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1980, **QE-16**(10): 1108
- [5] Kazumi Namba, Jiro Ida, Copper vapor laser pumped dye amplifier of a CW dye laser. *Japan J. Appl. Phys.*, 1984, **23**(10): 1330
- [6] L. G. Nair, K. Dasgupta, Amplified spontaneous emission in narrow-band pulsed dye laser oscillator—theory and experiment. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1985, **QE-21**(11): 1782
- [7] Alejandro A. Hnilo *et al.*, Stored energy in pulsed dye laser amplifier. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1986, **QE-22**(1): 20
- [8] K. Dasgupta, L. G. Nair, Optimum gain length for pulsed dye laser amplifier. *Appl. Phys.*, 1990, **B50**: 133
- [9] 前田三勇,内海通弘, Optimum design of a multi-stage dye-laser amplifier pumped with Cu-vapor laser. *しへが*—研究,平成 2 年, **18**(7): 475
- [10] K. Dasgupta, L. G. Nair, Effect of excited-state absorption at signal wavelength in pulsed-dye-laser amplifiers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, **QE-26**(1): 189

Effect of longitudinal distribution of pumping beam on conversion efficiency in dye amplifier transversely pumped by CVL

Zhang Liyan Ji Maoli Xu Xiandong Sen Tingting
(Laser Division, Institute of Physical and Chemical Engineering, Tianjin 300180)

(Received 23 November 1992)

Abstract

In this paper, a set of rate equations, which describes nearly all the significant effects in dye laser amplifier transversely pumped by CVL, is given. Effect of longitudinal distribution of pumping beam on the conversion efficiency is calculated and analyzed on the condition of different input signal. The meaning of the obtained results in improving and designing the dye laser amplifier is discussed.

Key words copper vapor laser(CVL), rate equation, conversion efficiency.