

染料放大器的 ASE 和飞秒脉冲放大

肖纲要 何慧娟 沈晋汇 刘玉璞 张影华 陆培华 王之江

(中国科学院上海光机所激光技术开放实验室, 上海 201800)

提要 分析了染料放大器(DLA)的放大的自发辐射(ASE)的分布、上能级以及三重态粒子数分布。用数学方法模拟计算了泵浦作用时非饱和情形下染料分子的储能和飞秒脉冲的放大。我们认为,设计一个染料放大器必须考虑三重态积累对分子储能的影响。用调Q倍频Nd:YAG脉冲同步泵浦染料二级放大器放大飞秒脉冲,得到的第一、二级放大倍数分别为1000和60,对于第一级放大,计算结果与实验结果基本相符。

关键词 染料放大器,放大的自发辐射,储能,增益,系际交叉

ASE of dye medium in a DLA and fs pulse amplification

XIAO Gangyao, HE Huijuan, SHEN Jinhui, LIU Yupu,

ZHANG Yinghua, LU Peihua, WANG Zhijiang

(Laboratory of Laser Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Academia Sinica, Shanghai 201800)

Abstract The distributions of Amplified Spontaneous Emission (ASE) in the Dye Laser Amplifier (DLA) as well as the excited level and triplet state populations of the dye have been reported. The store energy of dye molecules and the amplification of fs pulses in condition of under saturable energy were calculated by mathematical simulation. According to our analyzing, the decreasing of store energy caused by triplet state absorbing must be taken into account when designing a DLA. Experimentally with Q-switched Nd:YAG synchronously pumped two-stage dye laser amplifier, we have got the amplification gain of 1000 and 60 for the first and the second stage respectively. To the first stage, our calculation result can be fit well with the experiment.

Key words dye laser amplifier, amplified spontaneous emission, store energy, intersystem crossing

1 引言

染料能够用作增益介质的最显著优点是它们具有比固体介质大得多的受激发射截面和较高的增益。它们溶于某些溶剂中能够在不同的波段获得较宽的增益带宽,适合于不同波段的宽光谱放大。

但是,由于染料分子上能级寿命较短,泵浦作用下会产生较强的放大的自发辐射(ASE)。

ASE 的存在耗空了一部分储能,不利于提高放大器增益。设计染料放大器时,必须考虑染料 ASE 特性,设法降低 ASE 水平。

染料分子单重态与三重态之间的系际交叉也会耗空一部分上能级粒子数,强泵浦时严重的三重态吸收还可能导致染料荧光的三重态猝灭,所以,设计染料放大器还必须考虑三重态的影响。

2 速率方程、粒子数分布和 ASE

把染料分子近似为一个二能级系统,并假设 ASE 谱为单色谱且泵浦光低于染料饱和能流密度,泵浦过程的速率方程为

$$\frac{dN_1}{dt} = N_0 \cdot W(t) - \frac{N_1}{\tau} - N_1\sigma_e(I^+ + I^-) + N_0\sigma_a(I^+ + I^-) \quad (1a)$$

$$\frac{dN_T}{dt} = K_{sr}N_1 - \frac{N_T}{\tau_T} \quad (1b)$$

$$\pm \frac{dI^\pm}{dx} = N_1\sigma_e I^\pm - \frac{N_1}{\tau} \Phi g^\pm(x) - \sigma_a N_0 I^\pm - \sigma_T N_T I^\pm \quad (1c)$$

$$g^+(x) = \frac{1}{2} [1 - (L-x) / \sqrt{(L-x)^2 + R^2}]$$

$$g^-(x) = \frac{1}{2} [1 - x / \sqrt{x^2 + R^2}]$$

$$W(t) = W_0 \exp[-4 \ln 2 t^2 / \tau_p^2]$$

$I^\pm(x)$ 为沿 $\pm x$ 方向的 ASE 光子流密度。

A. A. Hnilo^[1] 和 Ganiel^[2] 分别讨论了染料介质的 ASE 特性和小信号增益。但他们解决问题的途径都是对方程(1)求稳态解,而且他们实际上都未讨论三重态积累对储能的影响。我们认为,在泵浦脉冲宽度 τ_p 近似于上能级粒子寿命的情况下,应该在动态情况下解方程(1),且三重态的影响不能忽略,这在飞秒脉冲同步泵浦放大时尤其必要,图 1,2 分别示出了我们求得的激发态和三重态的粒子数及 ASE 光子流密度,其中选用参数列于表 1,2。三重态对储能的影响为

$$\frac{\int_0^L N_T(x) dx}{\int_0^L N_1(x) dx} \times 100\% \approx 11 \quad (2)$$

三重态的存在确实耗空了一部分储能,所以我们在实验中必须考虑三重态的影响。

Table 1 Parameters for R_{640} in the calculation

σ_e (cm ²)	σ_a (cm ²)	σ_T (cm ²)	τ (s)	τ_T (s)	K_{sr}	Φ
1.8×10^{-16}	1.0×10^{-18}	5.5×10^{-17}	5.5×10^{-9}	2.0×10^{-7}	3.4×10^5	0.22
Ref. 4	Ref. 4	Ref. 5	Ref. 6	Ref. 5	Ref. 5	Ref. 7

Table 2 Parameters of our amplifier

R (cm)	L (cm)	W_0 (s ⁻¹)	τ_p (ns)	N (cm ⁻³)
2×10^{-2}	1.6	5×10^7	10	3×10^{18}

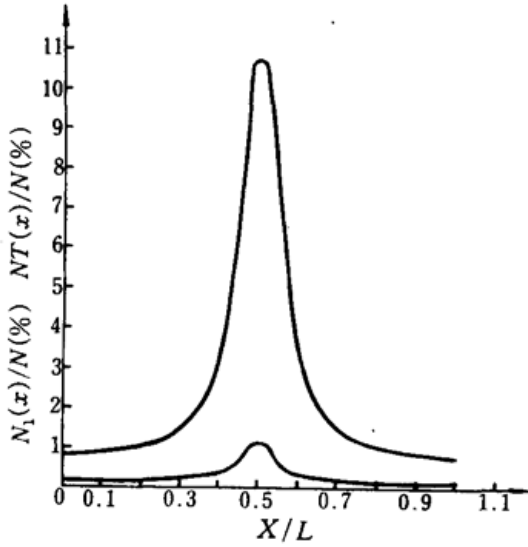


Fig. 1 Distributions of excited level and triplet state populations. Upper : $N_1(x)$ in percent of N ; Lower : $N_T(x)$ in percent of N ($W_0 = 5 \times 10^7$ (s^{-1}))

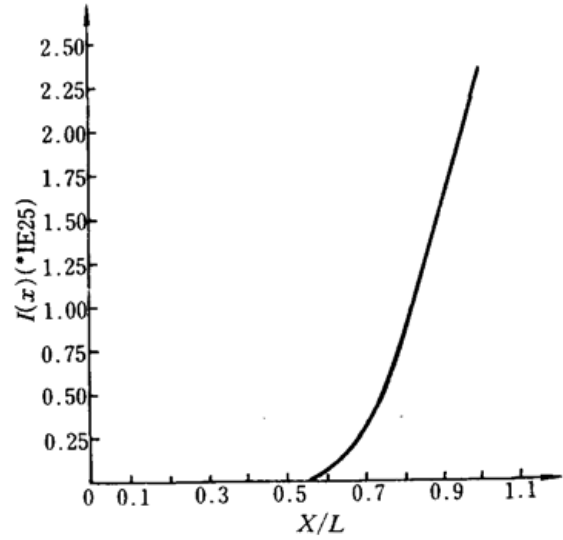


Fig. 2 ASE photon flux at different position of dye cell

3 信号脉冲放大

染料分子获得储能后,如果让信号脉冲同步通过增益区域,就可以被放大。由于信号脉冲的脉宽 τ_s 及通过增益区的渡越时间都很短 ($\tau_s, \Delta t \ll \tau, \tau_T, K_{ST}^{-1}$),放大过程中的分子各项弛豫均可忽略不计。对文献[3]中式(2.31)和(2.32)稍作修改,得到

$$\frac{dN_1}{dt} = - \sigma_e(\lambda_s) N_1 I_t \tag{3a}$$

$$\frac{dI_c}{dx} = + \sigma_e(\lambda_s) N_1 I_t \tag{3b}$$

其中

$$N_1(0) = N_1(t = -\infty)$$

$$I_t(0, t) = I_0 \text{sech}^2(1.76t/\tau_s) \quad (\tau_s \text{ 为半极大全宽值})$$

由(1)可算得信号脉冲输入、输出波形,见图 3 (a), (b)。

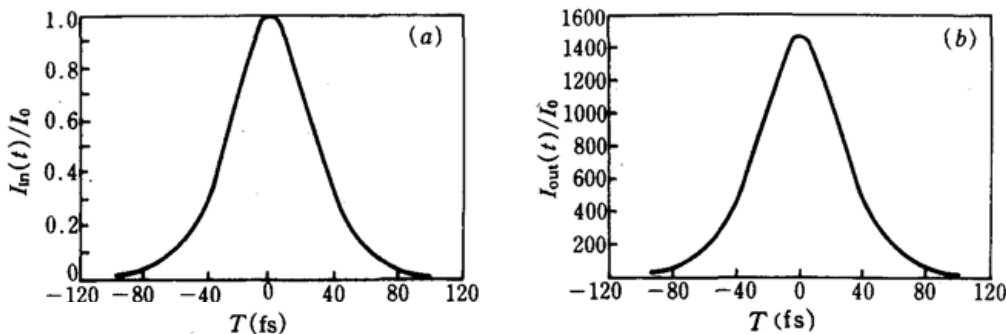


Fig. 3

(a) Input fs pulse wavefront assumed as a function of sech^2 , $\tau_s = 60$ fs, $I_0 = 3 \times 10^8$ ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

(b) Calculated wavefront of amplified pulse from DLA

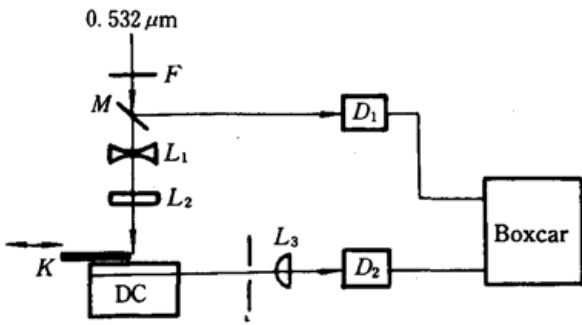


Fig. 4 Experimental setup for measuring the ASE output

F — variable neutral filter; *M* — beamsplitter; *L*₁, *L*₂ — column lens; DC — dye cell; *D*₁, *D*₂ — detectors; *K* — moving knife blade

4 装置与实验

4.1 ASE 的测量

图 4 为测量 ASE 的示意图, 泵浦光用一对母线相互正交的凹—凸柱透镜扩束和聚焦, 用以在染料盒中形成细长的激活区, 调整两柱透镜焦距, 可以使泵浦区均匀且泵浦光的焦斑深度与泵浦光在染料中的穿透深度相匹配。用一块能平移的不透明刀口紧贴染料盒的泵浦面, 移动刀口就可测出 ASE 的横向分布。此外, 改变泵浦强度, 即可测出不同泵浦速率时的 ASE 强度(图 5), 从该图看出, 泵浦速率 W_0 大于 $7 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ 时, 染料 ASE 饱和。

4.2 飞秒脉冲放大

图 6 为我们设计的同步泵浦二级染料飞秒脉冲放大器。小孔光阑和饱和吸收体的作用是为了滤去或吸收 ASE。实验测得结果列于表 3。针对第一级放大器, 我们的结果与计算相符。

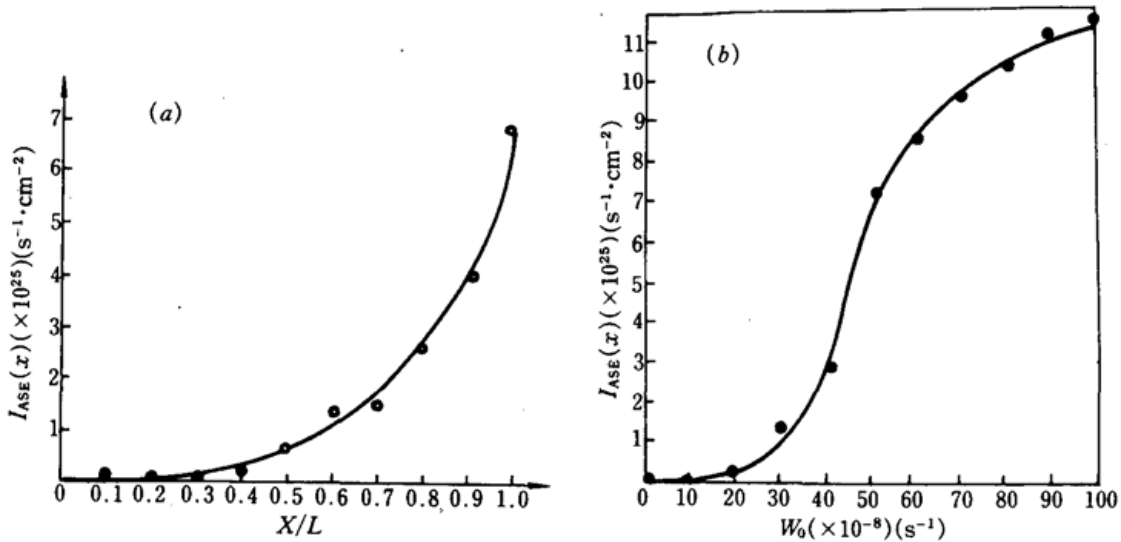


Fig. 5

(a) $I_{ASE}(x)$ at different position for $W_0 = 5 \times 10^7 \text{ (s}^{-1}\text{)}$; (b) $I_{ASE}(L)$ for different pumping rate
“.” and “.”: measured results

Table 3 Parameters of the two-stage DLA

Stage 1				Stage 2		
Medium	<i>N</i> (mol/l)	Gain	Absorbor	Medium	<i>N</i> (mol/l)	Gain
R ₆₄₀	5×10^{-3}	1000	DODCI	R ₆₄₀	5×10^{-4}	60

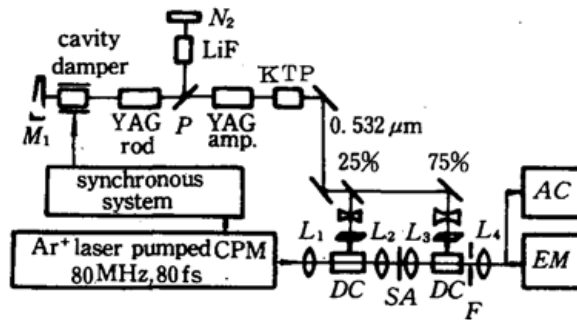


Fig. 6 Nd : YAG synchronously pumped fs DLA. The pumping energy distributed in first and second stage is 25% and 75% respectively. DC — dye cell (R_{640}); AS — saturable absorber (DODCl); AC—autocorrelator; EM—energy meter

5 结 论

染料放大器储能因三重态积累而降低。因为泵浦脉冲宽度与染料上能级寿命相近似，从泵浦抽运到储能的积累是一个动态过程，对于速率方程的求解就不能采取稳态近似。针对飞秒脉冲的放大，我们的实验结果略低于计算预言，这是因为染料对信号脉冲的重吸收及光阑与饱和吸收体的吸收损耗了一部分能量。

参 考 文 献

- 1 A. A. Hnilo *et al.*, *Opt. Commun.*, **60**(1), 87(1986)
- 2 U. Ganiel *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-11**(11), 881(1975)
- 3 *Ultrashort light pulses-picosecond technique and application*, Ed. by Shapiro, Pub. by Springer-Verlag, 1977, 65
- 4 A. Yariv *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **34**, 3410(1963)
- 5 J. P. Webb *et al.*, *J. Chem. Phys.*, **53**(11), 4227(1970)
- 6 M. E. Mack, *J. Appl. Phys.*, **39**, 2483(1968)
- 7 *Lambdachrome Laser Dyes*, **1**-133(1986), Ed. by Ulrich Brokmann, Pub. by Lambda Physik