

文章编号: 0258-7025(2003)05-0385-06

多级染料激光放大器中激光增益与放大自发辐射强度的理论研究

孔祥蕾, 罗晓琳, 张先燧, 张伟, 李海洋*

(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)

摘要 利用激光增益和放大自发辐射(ASE)理论, 对不同条件下的染料激光放大器的激光增益和 ASE 强度进行了数值计算。分析了当入射光强远小于和大于有效饱和光强时, 激光增益和 ASE 强度与入射光相对强度的关系, 讨论了在两种条件下 ASE 系数以及染料池端面反射系数对激光增益和 ASE 成分的影响。最后利用这些结果, 对连续激光的多级染料放大系统的优化设计进行了讨论。

关键词 激光技术; 染料激光放大器; 激光增益; 放大自发辐射

中图分类号 TN 248.3 **文献标识码** A

Theoretical Study on the Gain and Intensity of Amplified Spontaneous Emission in Multistage Dye Laser Amplifier

KONG Xiang-lei, LUO Xiao-lin, ZHANG Xian-yi, ZHANG Wei, LI Hai-yang

(Laboratory of Environmental Spectroscopy, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract Numerical calculations about the gain and ASE intensity of a dye laser amplifier are performed in two cases; the input laser flux is far smaller or larger than effective saturation flux. The influences of ASE coefficient and reflective coefficient of dye cells on the gain and ASE intensity are discussed too. These results are used to discuss the optimizing design of a CW laser seeded multistage dye laser amplifier.

Key words laser technique; dye laser amplifiers; gain; amplified spontaneous emission (ASE)

1 引言

高功率脉冲激光器抽运的染料激光器和染料激光放大器中, 放大的自发辐射(ASE)对整个系统的影响是十分显著的^[1~5]。对于高增益的染料激光放大系统, ASE 将影响系统对输入信号的增益系数, 使得信号的增益衰减, 并在输出中产生背景噪声。Haag 等利用速率方程理论和适当的边界条件, 研究了染料激光器和放大器中 ASE 的影响^[4]。Destro 等分析了铜蒸气激光器抽运的染料激光系统, 提出了一种根据实验中的输入和输出激光光强

数据, 得到染料的吸收截面和饱和光强的新方法^[5]。在数值计算方面, Hunter II 等对信号光单次和双次通过同一染料池, 在不同条件下的抽运效率进行了数值计算, 并发现双次通过染料池更有利于抽运效率的提高^[3]。Haag 等对放大系统的增益 G 进行了数值计算, 但他们的计算大多在入射光强接近和大于有效饱和光强的时候, 并未对当入射光强远小于有效饱和光强的时候进行单独的计算。

但在对连续激光进行多级脉冲放大的过程中, 前级放大和后级放大的相对入射光强有非常大的区

收稿日期: 2002-02-05; 收到修改稿日期: 2002-04-01

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。

* 通信联系人, E-mail: hli@aiofm. ac. cn

别,对应的增益与 ASE 光强有着不同的规律。而已有的文献对这方面的研究较少。我们在 Hagg 等理论研究的基础上^[4],对当入射光强远小于和大于有效饱和光强时,不同 ASE 系数和端面反射系数值对应的输入信号强度与增益之间的关系分别进行了数值计算,指出了两种情况下的区别。同时也对不同条件下输入信号强度和输出 ASE 光强的关系进行了计算。利用所得到的结果,对连续激光的多级染料放大系统的优化设计进行了讨论。

2 理 论

在下面讨论的理论模型中,假定抽运光的寿命远大于染料上能级的寿命,即为稳态抽运^[3,4]。如图 1 所示,抽运光从 x 方向被聚焦在抽运区域,入射种子光沿 z 轴方向射入。为简化起见,假设染料池在 x 方向和 y 方向的宽度相同,且有效抽运区域为一个直径为 d ,长为 L 的圆柱状区域,并满足 $d \ll L$ 。且染料池前后端面对 ASE 的有效反射率均为 r 。本文只考虑信号光单次通过染料池进行放大时的情况。

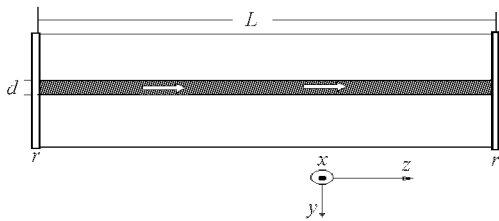


图 1 染料放大池

Fig. 1 Dye amplifier cell

忽略抽运光在沿 x 方向传播时由于染料的吸收引起的能量分布不均匀,可认为在整个抽运区域抽运能量是均匀的,根据 Beer 定理有

$$I_p = I_{p0}(1 - T)/\ln(1/T) \quad (1)$$

式中 I_p 为整个抽运区域的平均光强,单位为 $\text{photos} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, I_{p0} 为入射的总光强, T 为透过率。系统的增益 G 定义为

$$G = I_{\text{out}}/I_{\text{in}} \quad (2)$$

其中 I_{out} , I_{in} 分别为出射光和入射光的强度。根据激光运输方程和 ASE 的运输方程,可得到单程通过的染料放大池的增益 G 满足的超越方程^[4]为

$$(1 - 2A)\ln G + (G - 1) \left[\frac{I_{\text{in}}}{I_s} + \frac{2A(1 - r)}{1 - rG} \right] = \alpha_0 L \quad (3)$$

其中 A 为沿 z 轴方向的 ASE 能流系数,可用下式求得

$$A = \frac{d\Omega}{4\pi} \frac{\Delta\nu_n}{\Delta\nu_s} \frac{\tau_\mu}{\tau_s} \quad (4)$$

式中 τ_μ, τ_s 分别为激发态寿命和自发辐射寿命。其比例 τ_μ/τ_s 被称为荧光量子效率,可用 Q 表示。 $\frac{d\Omega}{4\pi}$ 为对 ASE 输出有贡献的立体角, $d\Omega$ 满足

$$d\Omega = 2\pi \left[1 + \frac{L}{d} - \sqrt{1 + \left(\frac{L}{d}\right)^2} \right] \frac{d}{L} \quad (5)$$

式(4)中 $\Delta\nu_n, \Delta\nu_s$ 分别为自发辐射的荧光 linewidth 和变窄的 ASE 线宽,有

$$\Delta\nu_n/\Delta\nu_s = (1 + \ln G)^{-1/2} \quad (6)$$

利用(5)式和(6)式,可将 A 表示为

$$A = \frac{Q \left[1 + \frac{L}{d} - \sqrt{1 + \left(\frac{L}{d}\right)^2} \right] \frac{d}{L}}{2 \sqrt{1 + \ln G}} = \frac{B}{2 \sqrt{1 + \ln G}} \quad (7)$$

显然,有 $B = Q \left[1 + \frac{L}{d} - \sqrt{1 + \left(\frac{L}{d}\right)^2} \right] \frac{d}{L}$ 。将式(7)代入式(3),可将式(3)重新表示为

$$\left(1 - \frac{B}{\sqrt{1 + \ln G}} \right) \ln G + \frac{B(1 - r)(G - 1)}{(1 - rG) \sqrt{1 + \ln G}} = \alpha_0 L - \frac{I_{\text{in}}}{I_s} (G - 1) \quad (8)$$

式(3)和式(8)中的 α_0 (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

$$\alpha_0 = \frac{n\sigma_c^\lambda \{ \sigma_{01}^{\text{eff}} \tau_s I_p [1 - (\sigma_{01}^\lambda \sigma_{\text{ep}}^{\text{eff}})/(\sigma_c^\lambda \sigma_{01}^{\text{eff}})] - \sigma_{01}^\lambda / \sigma_c^\lambda \}}{1 + (\sigma_{01}^{\text{eff}} + \sigma_{\text{ep}}^{\text{eff}}) \tau_s I_p} \quad (9)$$

$$I_s = \frac{1 + (\sigma_{01}^{\text{eff}} + \sigma_{\text{ep}}^{\text{eff}}) \tau_s I_p}{\sigma_c^\lambda \tau_s (1 + \sigma_{01}^\lambda / \sigma_c^\lambda)} \quad (10)$$

在式(9)和式(10)中所用到的各个符号的意义表示如下: n 为染料浓度, σ_{01}^{eff} 为抽运光波长对应的基态有效吸收截面, $\sigma_{\text{ep}}^{\text{eff}}$ 为抽运光波长对应的受激发射截面, σ_c^λ 为入射波长对应的受激发射截面, σ_{01}^λ 为入射波长对应的基态吸收截面。对应的 ASE 输出强度可由下式来进行计算

$$\phi_{\text{ASE}} = \frac{A(1 - r)}{1 - rG} (G - 1) \quad (11)$$

而对于式(3)和式(8),忽略 ASE,即有 $A = B = 0$, 则

$$\ln G = \alpha_0 L - \frac{I_{\text{in}}}{I_s} (G - 1) \quad (12)$$

即为忽略 ASE 时的激光增益表达式。这样,整个激光放大系统的抽运效率为

$$\eta = \frac{I_{\text{out}} - I_{\text{in}}}{I_{\text{po}}} \quad (13)$$

值得注意的是由式(3)可知,如果考虑到染料池对

ASE 的有效反射率不为零, 即 $r > 0$, 则必然有 $1 < G < 1/r$ 。

3 数值计算

对当入射光强远小于和大于有效饱和光强时, 不同 B 值和不同 r 值对应的输入信号强度与增益之间的关系分别进行了数值计算。同时也对不同条件下输入信号强度和输出 ASE 光强的关系进行了计算, 并研究了增益 G 与 ASE 之间的关系。

3.1 增益 G 与 I_{in}/I_s 的关系

图 2, 3 显示了不同条件下, 增益 G 随 I_{in}/I_s 变化的规律。图中的三条曲线分别代表 $\alpha_0 L = 20, 40, 60$ 时的不同情况。其中图 2 满足 $I_{in}/I_s \ll 1$, 对应小信号入射光 $I_{in}/I_s \ll 1$ 的情况, 图 3 为入射光大于有效饱和光强时即 $I_{in}/I_s > 1$ 的情况。可以看出, 增益 G 随着入射光强的相对强度增加而减小, 在其他条件相

同时, $\alpha_0 L$ 越大, 增益 G 亦越大。图 2(a) 中为忽略 ASE 效应时的情况, (b) 和 (c) 中为分别设 ASE 系数 $B = 0.002$ 和 0.02 , 但忽略染料池端面对 ASE 的反射, 即 $r = 0$ 时的情况。比较可知, 在小信号入射光的情况下, 即使不存在染料池端面的反射, 由于 B 的存在, 也会使得增益降低, 且 B 值越大, 这种下降越明显。图 2(d) 中考虑了 $B = 0.02, r = 0.0001$ 时的情况, 所以即使是很小的 r 值, 也会使增益有明显的下降。图 3 显示了当入射光大于饱和光强时的情况。和图 2 比较可以看出, 在 B 值和 r 值均不为零的条件下, 当入射光由 $10^{-2} I_s$ 上升到 I_s 时, 增益约下降了两个数量级。图 3(a) 中为忽略 ASE 时的情况, (b) 为设 $B = 0.02, r = 0.1$ 时的情况。与小信号时的情况不同, B 值和 r 值的存在并不会明显地降低增益。但值得注意的是, 这时系统输出的 ASE 光将会增加, 将严重影响输出光的质量。

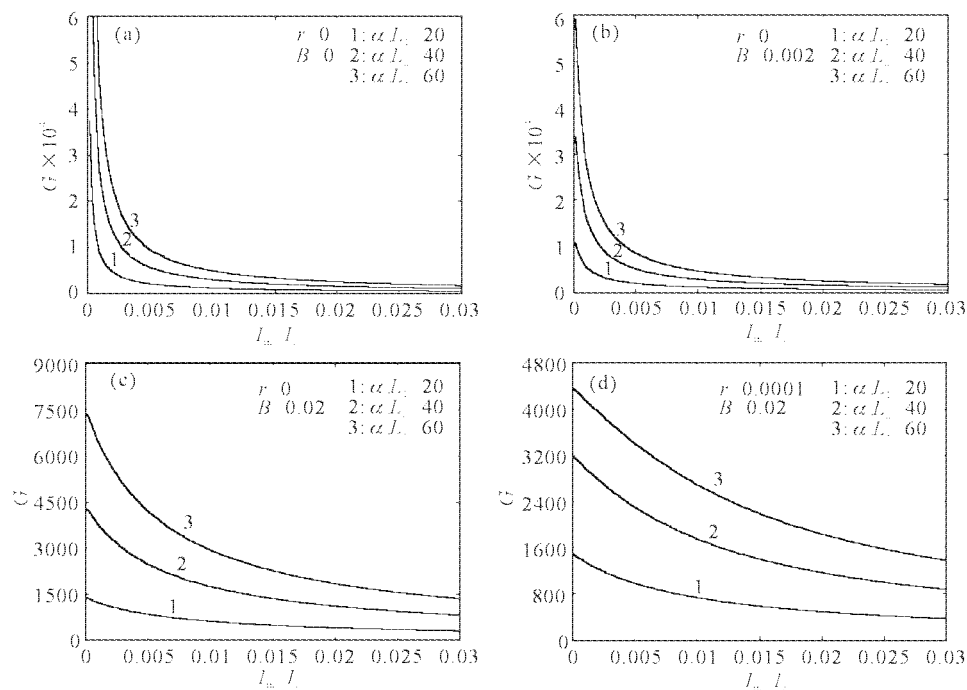


图 2 当 $I_{in}/I_s \ll 1$ 时, 不同条件下增益 G 与 I_{in}/I_s 的关系

Fig. 2 Relationship between G and I_{in}/I_s under different conditions, when $I_{in}/I_s \ll 1$

3.2 I_{out} 与 I_{in}/I_s 的关系及 ASE 与 G 的关系

图 4 表明了在小信号入射光条件下, 输出光强与输入光强的关系, 其中 (a) 为忽略 ASE 时的情况, (b) 为 $r = 0.0001, B = 0.02$ 时的情况。虽然增益随小信号输入光的增加迅速地减小, 但输出光强仍随输入光的增强而增加, 但很快这种增加会变得很

小, 即当输入光的光强大于一定值时, 输出光就基本上不再随输入光的增加而增加。当忽略 ASE 效应时, 对应的这种入射光强约为 $0.001 I_s$, 而图 4(b) 中的对应值约为 $0.04 I_s$, 约是相同条件下无 ASE 时的数十倍。这种在小信号条件下的输出饱和现象, 在一些对连续激光进行染料脉冲放大的实验中都已

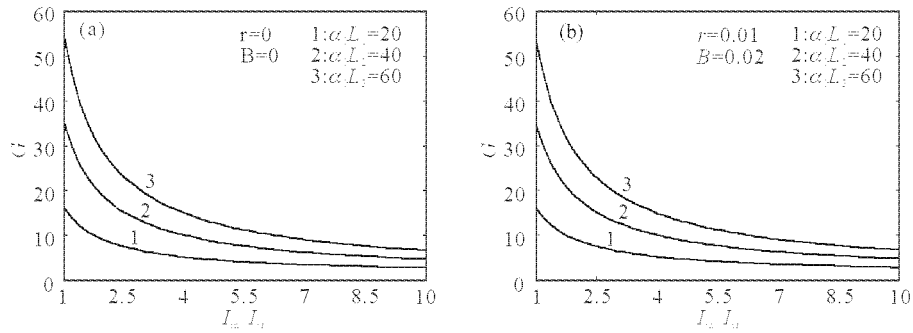


图 3 当 $I_{in}/I_s > 1$ 时,增益 G 与 I_{in}/I_s 的关系

Fig. 3 Relationship between G and I_{in}/I_s under different conditions, when $I_{in}/I_s > 1$

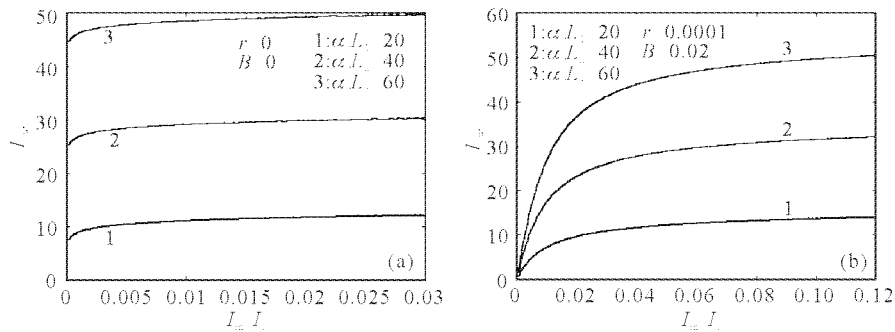


图 4 当 $I_{in}/I_s \ll 1$ 时,不同条件下 I_{out} 与 I_{in}/I_s 的关系

Fig. 4 Relationship between I_{out} and I_{in}/I_s under different conditions, when $I_{in}/I_s \ll 1$

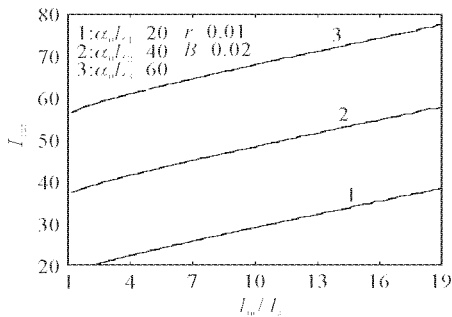


图 5 当 $I_{in}/I_s > 1$ 时, I_{out} 与 I_{in}/I_s 的关系

Fig. 5 Relationship between I_{out} and I_{in}/I_s , when $I_{in}/I_s > 1$

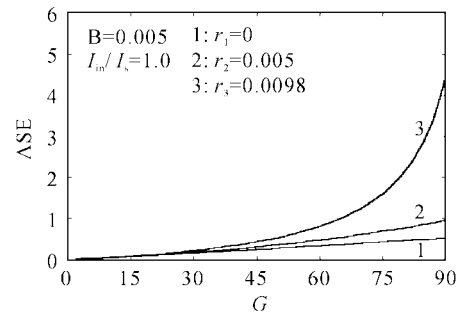


图 6 ASE 与增益 G 的关系

Fig. 6 Relationship between ASE AND G

被观察到^[6]。在入射光强大于有效饱和光强 I_s 的情况下, ASE 系数对增益的影响不大。图 5 给出了 $I_{in}/I_s > 1, r = 0.01, B = 0.02$ 时的输出光与输入光的强度关系。可以看出,在这种条件下,输出光与输入光的强度近似为线性关系,表明增益趋向一个稳定值。

图 6 显示了增益与输出的 ASE 强度的关系,其中曲线 1, 2, 3 对应 r 值分别为 0, 0.005 和 0.0098 时的情况。曲线表明在相同增益条件下, ASE 随染料池端面的有效反射率的增加而增加。从曲线 3 可以看出,对于一定的 r 值,当增益大于一定的值时,

ASE 会随着增益的增加而迅速地增加。实际上由于 r 值的存在,增益增加时的 ASE 的迅速增加就限制了增益 G 的值,使得其满足 $1 < G < 1/r$, 而这一点是无法通过增加染料浓度或加大抽运光能量所能克服的^[4]。

3.3 ASE 与 I_{in}/I_s 的关系

图 7 进一步表明了输出的 ASE 光与输入信号的关系。当输入信号极小时,由输入光引起的受激辐射光将小于自发辐射的光强,即输出信号会被 ASE 光淹没。这可通过比较图 7(a) 中输出 ASE 光强度和图 4(b) 中输出光强看出。当输入光大于一定

定强度时,输出光强将大于 ASE 的成分。对于图 7 (a)中的情况,为能够得到有效的输出,输入光强应大于 $0.005I_s$ 。相应地,当入射光强大于 I_s 时(图 7

(b)),输出 ASE 强度将远远小于小信号时的情况,且随着入射光强的增加而减小。

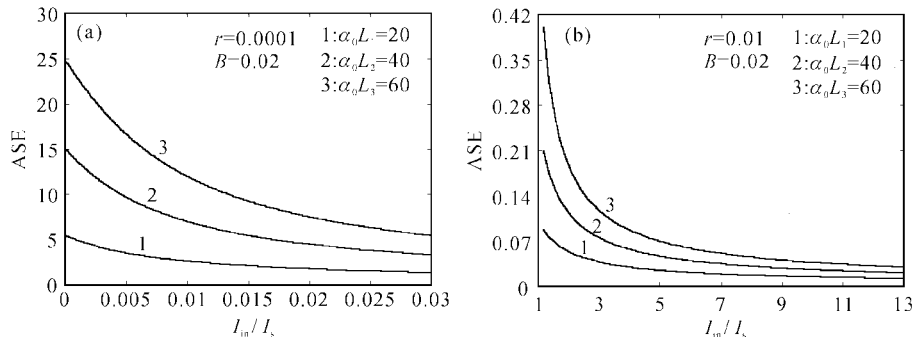


图 7 不同条件下 ASE 与 I_{in}/I_s 的关系

Fig. 7 Relationship between ASE and I_{in}/I_s in different conditions

4 讨 论

上面数值计算的结果表明,在小信号入射条件下,增益会随着 ASE 系数 B 和端面反射率 r 的增加而迅速地减小,同时 ASE 成分迅速地增加。但当入射光强大于有效饱和光强时,增益随着 B 和 r 的增加而下降的趋势并不明显,ASE 成分也要小得多。虽然小信号入射光的增益会随着入射光能量的增加而减小,但此时输出光的能量却基本保持不变,且 ASE 的成分会大大减小。这些结果对窄线宽、多级脉冲染料激光器和放大器的设计是非常有用的。

在对连续激光或小信号入射激光进行多级脉冲放大的过程中,前级放大池和后级放大池对应的入射光强有着非常大的区别。在设计中应分别加以考虑。从图 7 可以看出,前级放大池中产生的 ASE 成分比后级放大池中产生的要高出两个数量级左右。而 ASE 成分的增加不仅抑制了增益,也降低了输出光束的质量。所以在多级染料放大系统中应注意抑制前级放大中产生的 ASE 光。结合式(3)~(8)可知, B 值和 r 值的存在是产生 ASE 并降低增益的重要原因,图 2 也直接地说明了这一点。故降低放大池中 ASE 光强的主要方法就是减小 ASE 系数 B 值和降低染料池端面对 ASE 光的有效反射系数 r 。在设计中可以通过镀增透膜,保持端面的适当倾斜角来减小 r 值,实际上实验中建成的系统大都对此已有所考虑^[6,7]。从式(7)可以看出, B 值的降低要求系统有尽可能小的 d/L 值,但图 7 表明 L 值的增加也会使得 ASE 光强增加。因此,应选择适当的 d 值和 L 值来进行匹配以降低 B 值。在设计中,为在一定染料

池长度的条件下降低 B 值以减小放大的自发辐射光,可使得前级放大池中的有效抽运区直径小于后级放大池中的对应值,然后利用扩束器来实现孔径匹配^[8]。

对图 7 和图 4 的分析表明在前级放大中,入射光的强度必须满足一定的条件,才能让输出光强大于池中产生的 ASE 光强,而这一光强取决于 ASE 系数 B ,染料池端面反射率 r 和有效饱和光强 I_s ,而与系统的 $\alpha_0 L$ 值的关系并不大。为了降低前级放大池中的 ASE 成分,一个重要的方法是提高入射连续激光的相对强度。图 2 和图 4 表明了这种做法会降低系统的增益,但它对输出光的功率大小并无不利影响。在后级放大中,入射光强已接近或超过有效饱和光强, B 值和 r 值对增益的影响就不再象在第一级放大池中那么显著。但由于增益受到 r 的限制,所以 r 值也应避免太大。同时, B 值和 r 值的增加也会使放大池中产生的 ASE 增加。

图 2,3 的结果都表明对于某一染料池,输入光与相应有效饱和光强的比值越小,就可以获得越高的增益。所以,为尽可能地获得高增益,在对连续激光进行多级染料放大时可采用的一种方法是使得绝大部分的抽运能量都分配在后级放大池中。虽然这种方法会使得前级放大池对应的有效饱和光强会有所减小,但通过图 4 可以看出一般这种变化并不影响前级放大池的输出光强度。这与一些已建成的放大系统的抽运光能量分配比例在定性上是一致的^[8,9]。

在实际设计中,还必须考虑到多级染料池放大系统的级间耦合问题。由于在前级放大池中产生的

ASE 成分比在后级放大池中产生的 ASE 成分要强得多,必须有效地去除在前级放大器中产生的 ASE 光。在已建成的对连续激光进行多级脉冲放大的系统中,分别采用了在级间加入干涉滤光片、空间滤波及空间滤波与正像棱镜相结合等方法来去除在前级放大器中产生的 ASE 成分,并取得了较好的实验结果^[6~9]。Ni 等在第二级放大池中采用了 SBS 池来消除 ASE 成分,取得了非常好的实验结果^[8]。根据上面的分析,我们正在设计和加工一套用脉宽为 25ns 的 Nd:YAG 激光器抽运,用 Coherent 899-29 单模 CW 激光和三级染料池组成的放大系统,其输出脉冲光线宽可达 6.4 MHz,0.0002 cm⁻¹,能量可达 40 mJ/pulse。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 T. Efthimiopoulos, B. K. Garside. Amplification of spontaneous emission and gain measurement in dye amplifiers [J]. *Can. J. Phys.*, 1981, **59**:820~834
- 3 Allen M. Hunter, II, Robert O. Hunter, Jr.. Bidirectional amplification with nonsaturable absorption and amplified spontaneous emission [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1981, **QE-17**(9):1879~1887
- 4 Günter Häag, Martin Munz, Gerd Marowsky. Amplified spontaneous emission in laser oscillators and amplifiers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1983, **QE-19**(6):1149~1159
- 5 Marcello G. Destro, José W. Neri. Small-signal gain and saturation intensity in dye laser amplifiers [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(33):7007~7011
- 6 M. M. Salour. Powerful dye laser oscillator-amplifier system for high resolution and coherent pulse spectroscopy [J]. *Opt. Comm.*, 1977, **22**(2):202~206
- 7 Persis Drell, Steven Chu. A megawatt dye laser oscillator-amplifier system for high resolution spectroscopy [J]. *Opt. Comm.*, 1979, **28**(3):343~348
- 8 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
- 9 E. Cromwell, T. Trickl, Y. T. Lee *et al.*. Ultranarrow bandwidth VUV-XUV laser system [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1989, **60**(9):2888~2892

本刊增页及更改出版日期启 示

近年来,由于来稿量较多,而本刊的容量又有限,为了缩短论文的发表周期,故从 2004 年第 1 期起,经上级有关领导批准,本刊将从原来的 96 面增至 112 面,出版日期从每月 20 日提前为每月 10 日。特此通知。

《中国激光》编辑部

2004 年 5 月