

# 大型 KrF 放大器中的放大自发辐射\*

张春斌 张 路 巫德章

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

**提要** 设计了大型 KrF 准分子激光器放大自发辐射的三维和准三维计算程序, 比较了两种方法的差别。通过对不同纵横比、增益吸收比及注入光强条件下, 放大自发辐射(ASE)及提取效率的计算, 明确了影响提取效率的主要因素, 当注入强度为 0.1 饱和光强时, 其噪信比(ASE 强度与相干光输出强度比)约为 5%。

**关键词** 放大自发辐射, KrF 激光器, 放大器

## 1 引 言

KrF 准分子激光器以其波长短、提取效率高、可重复运行的优点使其成为惯性约束核聚变的候选驱动器。

要使激光器成为实用的驱动器, 两方面问题是要解决的, 一是脉宽压缩, 一是 ASE 的抑制。脉宽压缩方面, 采用所谓角多路传输的技术来解决, 取得较大进展<sup>[1,2]</sup>。由于介质的自发辐射速率特别高, 增益系数大, 高功率激光器要求大的体积和大的横截面, 所以 KrF 激光器的 ASE 引起人们普遍重视。ASE 对放大器至少有四方面的物理影响: (1) 它会引起横向增益非均匀性, 因而输出的相干流会产生横向空间不均匀, (2) 它会产生降低增益的寄生振荡, (3) 降低提取效率, (4) 增加激光器噪声。总之 ASE 会对激光器的相干性和效率有不利的影晌。

关于 ASE 的研究开始于 80 年代初<sup>[3~5]</sup>, 他们研究了稳态放大器中的一维 ASE 效应, 一般把 ASE 处理为平面波, 这种理论的实用性是有限的, 它只能描述纵横比较大的放大器。Lowenthal 和 Eggleston<sup>[6]</sup> 则提出了一种简化的三维模型, 对 ASE 的影响作了较仔细的研究, Sasaki 等(*J. Appl. Phys.*, 1988, 65: 231) 进一步对 ASE 作了三维研究。

本文对大型 KrF 放大器的 ASE 效应进行更深入的研究, 对 ASE 的三维模型和准三维模型进行了考查比较。通过计算, 明确了影响放大器效率的主要因素, 为 KrF 放大器的设计提供规律性的认识。

## 2 物理模型

因为我们所关心的时间尺度比起 KrF 上能态形成时间要长得多, 所以有理由认为在激光

\* 国家高技术惯性约束聚变主题。

收稿日期: 1994 年 12 月 2 日; 收到修改稿日期: 1995 年 6 月 13 日。

腔中(放大器或振荡器)激光过程已达稳态。下面建立稳态的含 ASE 的激光传输方程。

关于 ASE 的表达式,可由自发辐射的速率得到。

在频率区间  $d\nu$ , 单位体积自发辐射光子速率为

$$\frac{\Delta N \sigma(\nu) d\nu}{\tau_R} \quad (1)$$

其中  $\Delta = \frac{1}{\int_0^\infty \sigma(\nu) d\nu}$  是归一化常数;  $\sigma(\nu)$  是自发辐射截面, 相当于线宽函数;  $N$  为单位体积上能态数目;  $\tau_R$  为自发辐射寿命。

认为光子是各向同性发射, 则在观察点  $(x_0, y_0, z_0)$  所观察到的来自体积元  $dV$  的光子流为

$$dI_{SE} = h\nu \frac{\Delta N \sigma(\nu) d\nu}{\tau_R} \cdot \frac{dV}{4\pi} \quad (2)$$

观察点到发射点  $(x, y, z)$  之间的距离为

$$r = [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]^{1/2} \quad (3)$$

当这些光子沿路径  $r$  传播时会得到增益, 于是形成了所谓放大的自发辐射 (ASE), 且

$$dI_{ASE} = dI_{SE} \exp \left\{ \int \left[ \frac{g\sigma(\nu)}{\sigma_0} - a_{NS} \right] dl \right\} \quad (4)$$

其中,  $\sigma_0$  是谱线中心截面;  $g = N\sigma_0$  为局域增益系数, 是位置的函数;  $a_{NS}$  是非饱和吸收系数。

为了计算方便, 将光强归一为饱和光强

$$I_s \equiv h\nu / [\sigma(\nu)\tau_s] \quad (5)$$

对相干流  $I_{s_0} \equiv h\nu / \sigma_0 \tau_s$ , 即相干流归一至线中心饱和光强, 其中  $\tau_s$  为激光上能态寿命。路径积分  $dl$  是由发射点  $(x, y, z)$  到观察点  $(x_0, y_0, z_0)$ 。

这样, 整个腔体对观察点的 ASE 贡献为

$$I_{ASE} = \Delta \frac{\tau_s}{\tau_R} \int d\nu \int dV \frac{\sigma^2 g(x, y, z)}{4\pi\sigma_0 r^2} \cdot \exp \left\{ \int \left[ \frac{g(x', y', z')\sigma}{\sigma_0} - a_{NS} \right] dl \right\} \quad (6)$$

相干流的方程为

$$dI_c^\pm = \pm I_c^\pm [g(x, y, z) - a_{NS}] dz \quad (7)$$

$$I_c = I^+ + I^- \quad (8)$$

局域增益与流的关系为

$$g(x, y, z) = \frac{g_0(x, y, z)}{1 + I_c(x, y, z) + I_{ASE}(x, y, z)} \quad (9)$$

符号 +, - 分别代表沿  $z$  轴正、负方向,  $z$  的正方向定为注入流的方向。

自洽求解(6)~(9), 解出  $g, I_c(I_c^+, I_c^-)$  及  $I_{ASE}$ 。具体解法是: 首先给出初始  $g$ , 依照(6), (7), (8) 求出  $I_{ASE}, I_c$ 。根据求出的  $I_{ASE}, I_c$  由(9) 求出新的  $g$ , 这个过程一直进行, 直到相邻两次的值相差满足某一精度。

引进提取效率和功率增益

$$\eta_{ext} = (I_{out} - I_{in}) / g_0 L \quad (10)$$

$$G = I_{out} / I_{in} \quad (11)$$

$I_{out}$  即上面的  $I^-$ ,  $I_{in}$  为注入流强度,  $g_0$  为小信号增益,  $L$  为腔长。

有了式(6)~(11), 原则上即可求解系统的 ASE 强度、相干流强度、激光器的提取效率和功率增益。下面说明完全三维与准三维模型的区别。

我们所研究的腔体确定为圆柱体,在完全三维模型中,认为光强和增益是  $r$  和  $z$  的函数。在准三维模型中,则认为光强和增益只是  $z$  的函数,即同一圆柱截面上,相干流、ASE 和  $g$  是相同的,也就是说对径向,上述物理量不能给出应有的变化,但计算中包含了半径和体积的影响,所以它不单是一维问题。

对于准三维(或称简化三维),可容易写出适于计算的表达式,这里从略。在实际计算中,有几个问题要考虑,一是激光器的末端镜,在双通道放大器中,一般有末端镜反射相干流,它同时也会将 ASE 流反射回介质,我们采用镜像反射的方法<sup>[6]</sup>。关于激光的谱型,即  $\sigma(\nu)$ ,基本上与线宽函数相当,这就有平顶型,高斯型及罗仑兹型的区分。

### 3 完全三维与准三维计算结果的比较

#### 3.1 $L/D = 1, g_0L = 10, \gamma = 20, I_{in} = 0.1$

计算结果见表 1 和图 1。表 1 上半部给出的是在计算 ASE 时不考虑末端镜的反射,这样 ASE 明显下降,相干流也有较多增加,因而提取效率也就增加较大。可以看到,当不计入末端镜时(在 ASE 计算中),三维和准三维比较一致,对效率几乎没有影响。当计入末端镜后,则准三维对效率计算结果偏低。表中列出的光强是径向分布,而图中给出的是纵向分布。

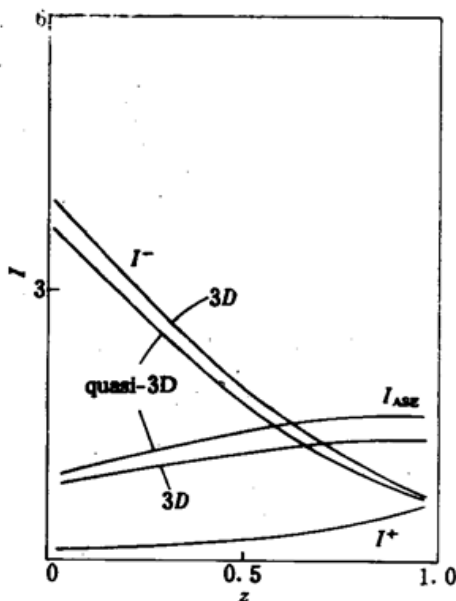


Fig. 1 Intensity distribution of  $I^+$ ,  $I^-$ , and  $I_{ASE}$  along the central line (ASE with mirror)

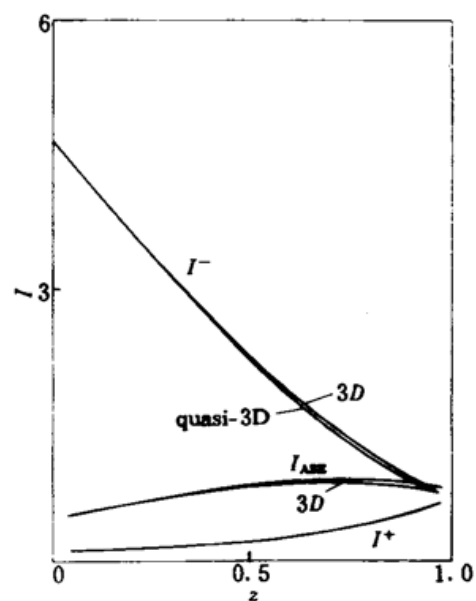


Fig. 2 Intensity distribution of  $I^+$ ,  $I^-$ , and  $I_{ASE}$  along the central line (ASE without mirror)

Table 1 Comparison of the results of 3D and quasi-3D (1)

		$I^-$ (center-side)	$I_{ASE}$ (center-side)	$\eta_{est}$
ASE without mirror	3D	4.5~4.8	0.47~0.37	0.46
ASE without mirror	quasi-3D	4.4	0.44	0.45
ASE with mirror	3D	3.89~4.18	0.84~0.74	0.395
ASE with mirror	quasi-3D	3.59	0.94	0.349

#### 3.2 $L/D = 1, g_0L = 10, \gamma = 15, I_{in} = 0.15$

计算结果列于表 2 和图 2。为比较,给出文献[6]的有关数据。文献[6]的数据未说明其中

计算 ASE 时有无末端镜。据我们分析,准三维可能是不计末端镜,而三维(三维结果不是[6]之作者计算的,只是引用未发表的其它作者的计算数据)则可能是计入了末端镜。三维计算的 40% 的提取效率,只是根据简单的算术平均而得到的。可见,有无末端镜情况,三维与准三维的相对比较与 3.1 相同。

Table 2 Comparison of the results of 3D and quasi-3D

		$I^-$ (center-side)	$I_{ASE}$ (center-side)	$\eta_{est}$ (without ASE)	$\eta$ (without ASE)
ASE without mirror	3D	4.3~4.6	0.42~0.32		
ASE without mirror	quasi-3D	4.5		0.44	
ASE with mirror	3D	3.9~4.1	0.7~0.6	0.386	
ASE with mirror	quasi-3D	3.7	0.74	0.355	0.52
Ref. [6]	3D	3.9~4.3		0.40	
Ref. [6]	quasi-3D	4.5		0.44	0.52

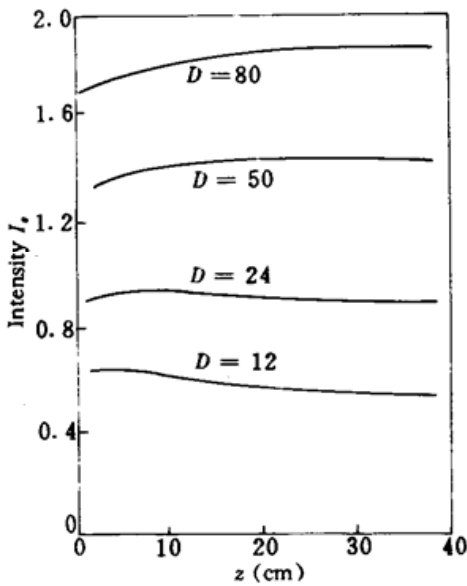


Fig. 3  $I_{ASE}$  distribution (3D,  $I_{in} = 0$ )

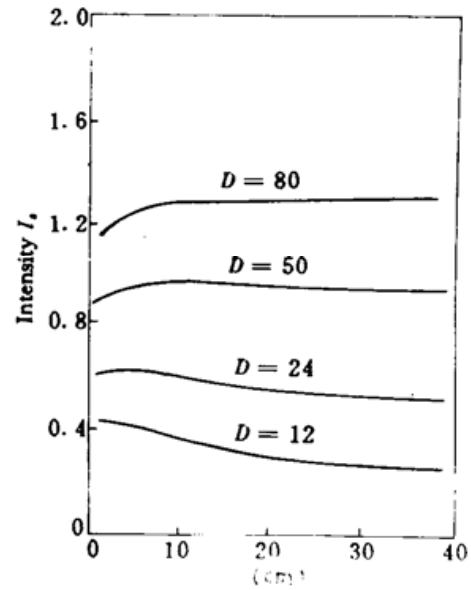


Fig. 4  $I_{ASE}$  distribution (quasi-3D,  $I_{in} = 0$ )

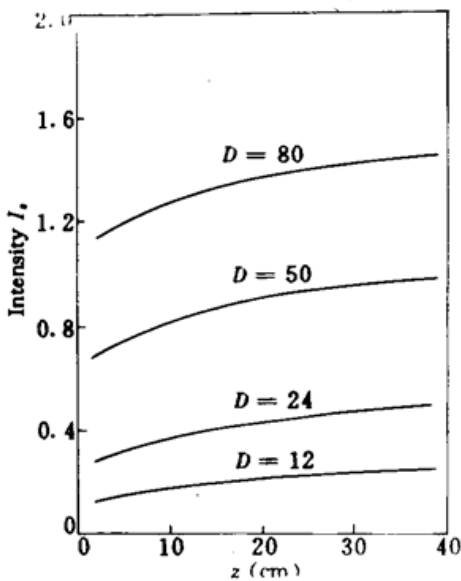


Fig. 5  $I_{ASE}$  distribution (3D,  $I_{in} = 0.1$ )

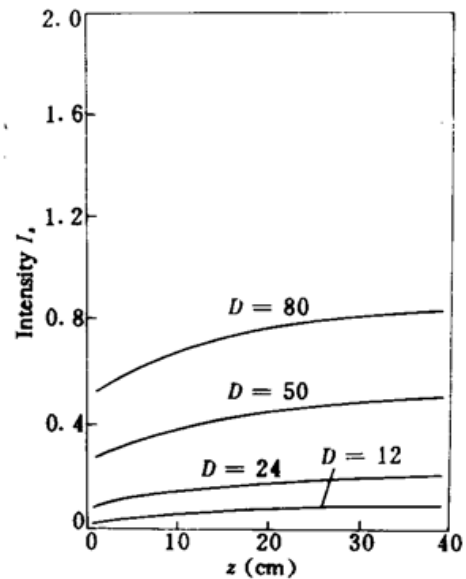


Fig. 6  $I_{ASE}$  distribution (quasi-3D,  $I_{in} = 0.1$ )

3.3 除上面两个结果外,对不同纵横比,当  $g_0L = 5.4$ ,  $\gamma = 13.5$ ,且当注入流分别为 0 和 0.1 时, ASE 的比较,见图 3~6。可以看出,当  $g_0L$  较小时,准三维所得  $I_{ASE}$  明显比三维小。

## 4 放大器设计中应注意的主要因素

为了提高放大器的提取效率有一系列要考虑的因素。

线型窄化的影响文献[6]已有讨论,即平顶型对提取效率降低最大,其次是高斯型,影响最小的是罗仑兹型。所以用平顶型计算的 ASE 是对 ASE 的高估(下面的结果均为平顶型)。

增益损失比  $\gamma$  的影响也是很明显的,  $\gamma$  增加有利于效率的提高,这是由激活介质和泵浦强度决定的,我们一般取  $\gamma = 10$ 。

对放大器的结构,本文是取双通道平行平面腔,腔体为圆柱体,放大器的尺寸不直接引入,而是以  $g_0L$  和  $L/D$  这两个无量纲参数出现。

我们对一系列  $L/D$ , 计算了提取效率  $\eta_{\text{ext}}$  与注入光强的关系,由图 7 和图 8 可以看出,  $L/D$  对提取效率的影响是明显的。随  $L/D$  的减小,效率会单调下降。而对注入光强则有一个最佳值。除此以外,还可看到,  $g_0L = 15$  时,效率明显比  $g_0L = 10$  为低。当然,增大  $g_0L$  对功率放大是有好处的。但为了使 KrF 满足 ICF 驱动器的要求,则 KrF 激光器的本征效率应为 10% 以上。而我们知道, KrF 上能态生成效率约为 25%, 由此推论,提取效率为 40% 以上。由图 7 可得出,当  $g_0L = 10$ ,  $L/D > 3.3$ , 即可得到  $\eta_{\text{ext}} > 40\%$  (注入光强为 0.2), 换言之, 即当  $g_0L = 10$ ,  $g_0D < 3$ 。由此可认为,在一定注入载荷下,要达到提取效率为 40%, 则需要限制放大器的纵横比  $L/D > 3$ 。

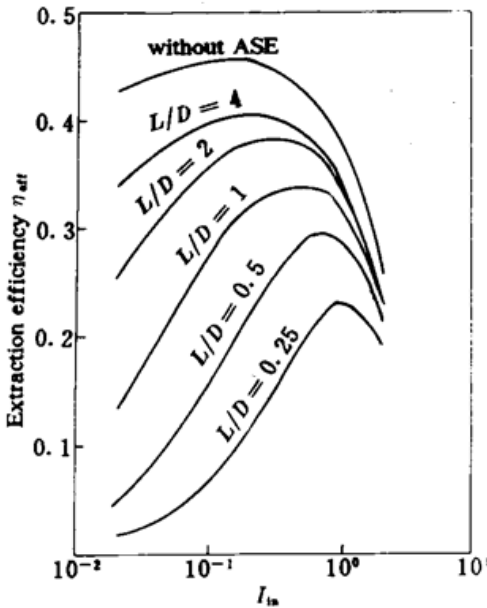


Fig. 7 Extraction efficiency vs input intensity  
( $g_0L = 10$ ,  $\gamma = 10$ )

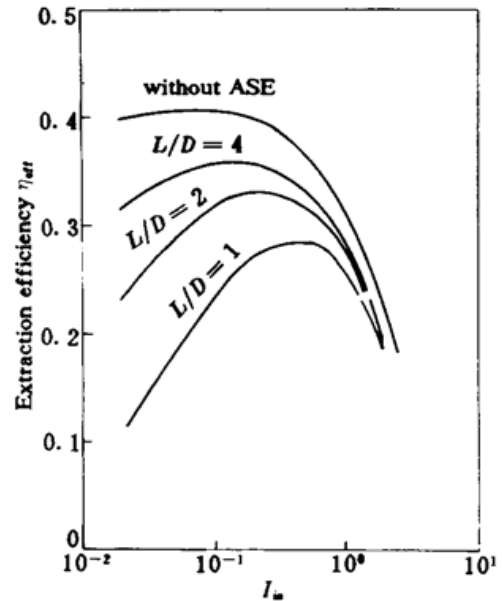


Fig. 8 Extraction efficiency vs input intensity  
( $g_0L = 15$ ,  $\gamma = 10$ )

## 5 “天光一号”KrF 放大器的噪声信比

中国原子能科学院研制的 100 J KrF 激光器,已于 1990 年获得 106 J 能量,其腔体结构<sup>[7]</sup>为  $\phi 200$  mm,  $L = 900$  mm 的圆柱体。我们近似取  $L/D = 4$ ,  $g_0L = 10$ ,  $\gamma = 10$ , 计算了其 ASE 的情况,给出了噪声信比 ( $I_{\text{ASE}}/I_{\text{out}}$ ) 与注入光强的关系曲线(图 9)。为了比较,还计算了同样结构参数的 XeCl 激光器的情况,可看到,当注入光强为 0.1 饱和光强时, KrF 的噪声信比约为 5%, 而 XeCl 则比 KrF 小一个量级,这进一步说明了 ASE 在 KrF 激光器中的重要性。

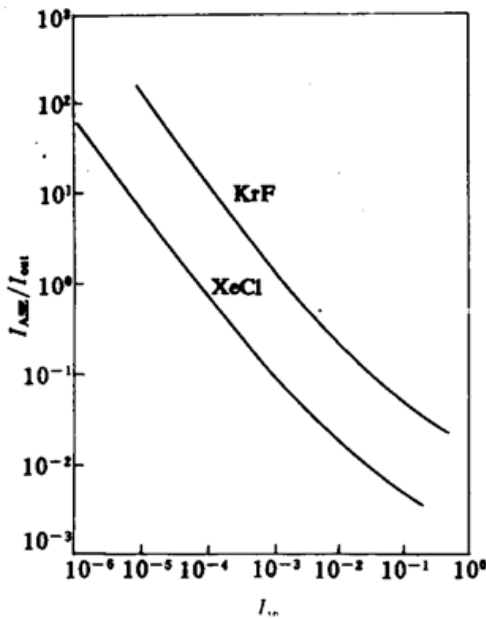


Fig. 9 Noise to signal ratio vs input intensity  
( $g_0L = 10$ ,  $\gamma = 10$ ,  $L/D = 4$ )

研究员等同志的有益帮助,在此表示感谢。

### 参 考 文 献

- 1 R. P. Sandoval. Angular multiplexing as a technique for short-pulse amplification in a high gain xenon amplifier. *J. Appl. Phys.*, 1978, 49 : 5745
- 2 M. A. Duguay, G. A. Fish, J. M. Hoffman *et al.*. Feasibility study relating to the use of high gain lasers, particularly HF, in controlled fusion application. SAND 76-0094, Sandia Laboratories, Albuquerque, NM 87115, Mar. 1976
- 3 A. M. Hunter, R. O. Hunter. Bi-directional amplification with nonsaturable absorption and amplified spontaneous emission. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1981, QE-17 : 1879
- 4 G. Marowsky, F. K. Tittel, W. L. Wilson *et al.*. Laser gain measurements by means of amplified spontaneous emission. *Appl. Opt.*, 1980, 19 : 138
- 5 G. Haag, M. Munz, G. Marowsky. Amplified spontaneous emission (ASE) in laser Oscillators and amplifiers. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1983, QE-19 : 1149
- 6 D. D. Lowenthal, J. M. Eggleston. ASE effects in small aspect ratio laser oscillators and amplifiers with nonsaturable absorption. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1986, QE-22 : 1165
- 7 周创志, 王孝君, 单玉生 等. 百焦耳 KrF 激光腔体设计和激光实验. *强激光与粒子束*, 1993, 5 : 505

## ASE in large KrF Amplifier

Zhang Chunbin Zhang Lu Wu Dezhang

(Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088)

**Abstract** The calculation program of ASE for a large KrF amplifier with full- 3D and quasi- 3D code is designed. Comparison between two models is performed. The ASE and extraction efficiency for a series of aspect ratio, gain to loss ratio and input intensity are calculated. With a 100 J KrF laser made in China as an amplifier, the noise to signal ratio is about 5% under 0.1 saturation input intensity. Our full- 3D and quasi- 3D codes are suited to the design of KrF lasers.

**Key words** amplified spontaneous emission, KrF laser, amplifier

## 6 结 论

我们研制的完全三维 (3D) 和准三维 (准 3D) 带 ASE 的激光传输程序, 可用于 KrF 激光器的设计与改进。在不同条件下, 3D 和准 3D 的差别相同, 例如  $g_0L$  的影响、镜反射的作用等。对于考虑镜反射 ASE 的情况, 准 3D 计算的提取效率比完全 3D 低。从激光器结构设计角度, 为了对 ASE 抑制, 主要途径是增加纵横比, 当  $L/D > 3$ , 注入光强在 0.1 ~ 0.3 饱和光强时, 可以得到 40% 的提取效率。“天光一号” KrF 激光器的噪信比 ( $I_{in} = 0.1$ ) 在 5% 左右。

**致谢** 本文在形成过程中, 曾在原子能院向有关同志作了报告和讨论, 得到王乃彦院士和单玉生