

# 准分子激光放大器中的三维 放大自发辐射效应

杜燕贻

(北京应用物理和计算数学研究所, 北京 100088)

**摘 要** 发展了小纵横比(长/直径)条件下、具有圆柱对称性介质的高功率 KrF 准分子激光放大器中, 放大自发辐射效应的三维理论模型和计算程序(3D-ASEP)。考虑自发辐射的频率分布效应以及侧壁表面反射效应。结果分析表明: 当纵横比及入射负载均较小时, 放大自发辐射对输出光束质量有较大影响。给出了介质参量的最佳定标。对现有实验装置(天光 I 号)及多级放大系统作了模拟计算, 为实验上改善光束质量提供了一定的理论数据。

**关键词** 准分子激光放大器, 放大自发辐射(ASE), 泵浦效率。

## 1 引 言

在稀有气体卤化物类激光放大器中, 存在放大自发辐射(ASE)效应。放大自发辐射流的存在不仅会减少受激分子数目, 降低吸收效率, 而且还将引起输出光束质量明显下降。另一方面, 它可用于对介质的监视诊断作用, 以确定参量定标。尤其对具有高自发辐射率、高增益系数以及小纵横比介质结构的 KrF 等器件, 放大自发辐射效应已成为困扰该类放大器件的问题之一。因此, 有必要对放大自发辐射效应做系统理论分析。

Hunter<sup>[1]</sup> 等解析估算了含频率分布效应的放大自发辐射一维模型; Lowenthal<sup>[2]</sup> 等对圆柱几何体型的双通式激光放大器和振荡器作了仅考虑放大自发辐射效应轴上解的半解析半数值模拟。Sasaki<sup>[3]</sup> 等对上述情形作了三维模拟计算, 加入侧壁反射效应, 但没考虑频率分布效应。本文在上述工作的基础上, 提出了更加全面完整的三维放大自发辐射效应理论模型, 包含了非饱和吸收效应、双通终端镜反射效应、侧壁表面反射效应以及由频率分布引起的线型变化效应。使用合理的计算方法, 编制了 3D-ASEP 计算程序, 并通过计算程序的处理, 使每一个含有放大自发辐射的单元对自身单元的贡献也包含了。

## 2 理论公式

### 2.1 模型建立

#### 2.1.1 放大自发辐射流表达式

介质内任一点  $P_0(r)$  处的放大自发辐射流由两大部分组成: 1) 介质内任一体积元  $dV$  内

的自发辐射光子流直接或由介质终端反射镜反射后到达  $P_0(\mathbf{r})$  处的值。定义为  $d\Phi_1$ 。2) 介质侧壁表面元  $dS$  对介质内部光子流的反射使之到达  $P_0(\mathbf{r})$  出的值。定义为  $d\Phi_2$ 。又由于自发辐射均匀分布在整個介质内, 故  $P_0(\mathbf{r})$  处放大自发辐射流的大小应为对整个介质体元及面元的积分。有:

$$I_{ASB}(P_0, \nu) = \int d\Phi_1 + \int d\Phi_2 \quad (1)$$

相对饱和光强规一化后具体表达式<sup>[2, 4, 7]</sup>:

$$\begin{aligned} \beta_{ASB} = & \frac{\tau_u}{\tau_{sp}} \int d\nu \frac{g(\nu_0, P_s)}{4\pi |\mathbf{r}_s - \mathbf{r}|^2} \int_{-\infty}^{+\infty} d\nu \frac{f^2(\nu - \nu_0)}{f(0)} \exp \left\{ \int_P^{P_0} dt \left[ g(P, \nu_0) \frac{f(\nu - \nu_0)}{f(0)} - \alpha_{NS} \right] \right\} \\ & + \sigma(\nu_0) \tau_u \int dS \frac{\cos(P_0, \mathbf{n})}{|\mathbf{r}_s - \mathbf{r}|^2} \int_{-\infty}^{+\infty} d\nu R(P_0, P_s, \nu) \frac{f(\nu - \nu_0)}{f(0)} \\ & \times \exp \left\{ \int_{P_s}^{P_0} dt \left[ g(P, \nu_0) \frac{f(\nu - \nu_0)}{f(0)} - \alpha_{NS} \right] \right\} \quad (2) \end{aligned}$$

其中  $f(\nu - \nu_0)$  为规一化线型函数,  $\tau_{sp}$  为自发辐射寿命,  $\tau_u$  为介质有效激发态寿命,  $\alpha_{NS}$  为介质非饱和吸收系数,  $g(\nu_0)$  为中心频率  $\nu_0$  处的小信号增益,  $\sigma(\nu_0)$  为中心频率处感应辐射横截面,  $d\int$  指从  $P(\mathbf{r}')$  到  $P_0(\mathbf{r}')$  的路径积分元。  $|\mathbf{r}_s - \mathbf{r}|$ 、 $|\mathbf{r}_s - \mathbf{r}|$  分别为  $P_s$ 、 $P_s$  到  $P_0$  点连线的距离,  $\cos(P_0, \mathbf{n})$  为  $dS$  的法线方向与  $dS$  到  $P_0(\mathbf{r})$  连线之夹角的余弦。

### 2.1.2 激光相干流表达式

在双通式激光放大器中, 设  $\beta_c^+$ 、 $\beta_c^-$  为归一化正向及反向传播的相干流, 并设位于谱线中心处且沿轴向平行传播, 有

$$d\beta_c^\pm(z) = \beta_c^\pm(z) [g(z, \nu_0) - \alpha_{NS}] dz \quad (3)$$

结合光强与增益系数关系:  $g(\nu_0) = g_0 / (1 + \beta_c + \beta_{ASB})$ , (4)

(2)~(4)式组成了激光放大器中含放大自发辐射效应的光传输理论模型。

### 2.1.3 几种效应处理

除了考虑均匀非饱和吸收效应及双通器件终端镜反射效应<sup>[2, 7]</sup>, 本文还考虑了侧壁对放大自发辐射的反射效应及频率分布引起的线型窄化效应。线型函数取洛仑兹型(L)、高斯型(G)、平顶型(F)<sup>[5]</sup>。侧壁对放大自发辐射的反射效应用 Lambertain 漫反射原理处理<sup>[4, 6]</sup>, 但忽略入射光子角度相关性。

## 2.2 计算方法及三维程序

本模型只能用数值计算方法处理。为计算合理省时, 对该模型作了合理假定<sup>[9]</sup>:

1) 放大器具有圆柱对称性, 其长度为  $L$ , 直径为  $D$ ; 2) 电子束均匀激发泵浦介质, 则介质内光强及增益对中心轴线呈对称分布; 3) 相干光仅考虑中心频率处轴向分布效应。根据上述假定编制了三维程序。通常对  $10 \times 5$  (纵向  $\times$  径向) 的网格分布, 所用“SUN490” CPU 时间为 30 分钟左右。

## 3 分析及总结

将本程序计算得到的介质中心轴线上的激光及放大自发辐射分布情况与文献[2]中的计算结果相比较, 其一致性证明了本程序的正确合理性。

### 3.1 介质径向尺寸对放大自发辐射的影响

计算发现, 介质纵横比对放大自发辐射流有较大影响, 当  $D \ll L$  时, 可忽略放大自发辐射效应。当  $L/D$  较小时, 放大自发辐射流明显增大; 对同一介质, 输出端面处放大自发辐射流随着径向尺寸的增大而减小, 即中心轴上放大自发辐射流最大, 而边沿处放大自发辐射流最小。图 1 给出无负载情况下不同径向尺寸时净放大自发辐射流大小及分布。显然, 在小纵横比情况下, 介质径向尺度对放大自发辐射有很大影响, 这时的光强分布已不是一维的指数形式而是在整个介质内趋于较光滑分布。

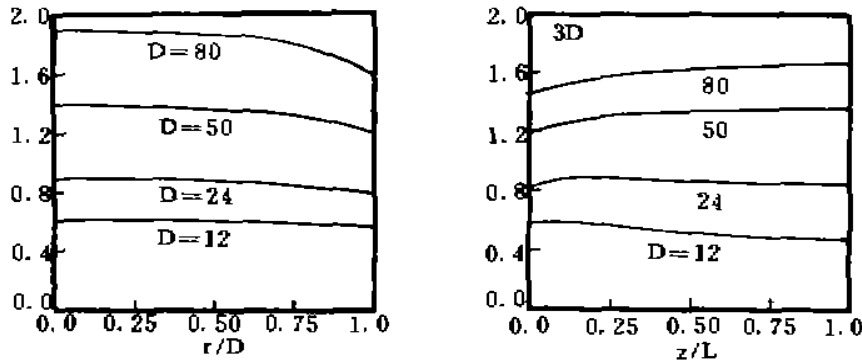


Fig. 1 Net ASE intensity distribution in a double-pass amplifier of various aperture diameters.  $L = 40 \text{ cm}$ ,  $D = 12 \sim 80 \text{ cm}$ ,  $g_0 = 13.5 \% \text{ cm}^{-1}$ ,  $\alpha = 1 \% \text{ cm}^{-1}$

### 3.2 放大器介质参量定标

分析表明, 介质各参量对放大自发辐射都有不同程度的影响。为实现泵浦效率大于 40%、功率增益大于 20 的实际要求, 本程序对各参量的影响作综合计算分析如图 2, 得到介质的最佳参量定标为:  $g_0L = 10$ ,  $g_0D \leq 3$ 。  $\beta_{in}$  为入射负载。

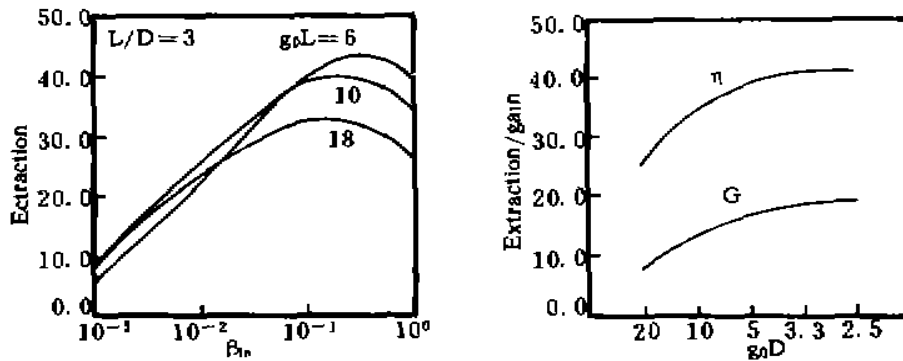


Fig. 2 Parameters of double-pass amplifier medium

$\eta$ : pumping efficiency;  $G$ : power gain

### 3.3 侧壁表面反射效应及线型窄化效应

当入射负载与纵横比均较小时, 侧壁反射对能量的引出有较为显著的影响。图 3 中给出  $L/D = 1$  或 4 两种情况, 曲线 1'、2' 对应无侧壁反射, 1、2 对应有 10% 的侧壁反射, 曲线 3 对应没有放大自发辐射的情况。可见当  $L > 4$  时其影响可忽略不计。线型窄化效应减弱放大自发辐射的作用。如图 4 所示, 频率分布对放大自发辐射的影响随着入射负载的减小而明显增大。

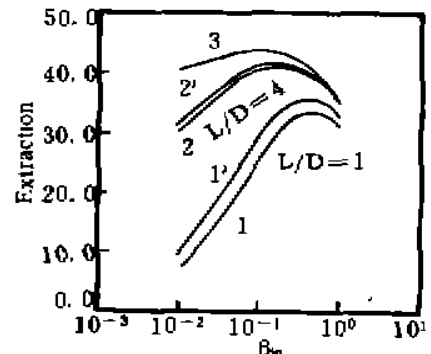


Fig. 3 Extraction efficiency of double-pass amplifier vs input intensity with and without ASE and 0% and 10% wall reflectivity

如在  $\beta_n = 0.01$  时, 洛仑兹型比平顶型效率增加约一倍左右。同时还可看到, 大增益损耗比 ( $\gamma$ ) 可有效抑制放大自发辐射, 提高效率。

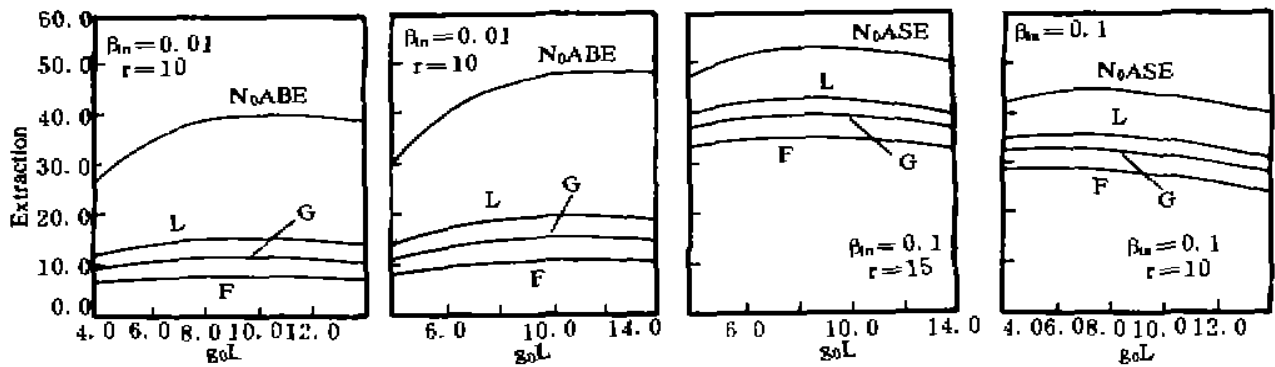


Fig. 4 Extraction efficiency of double-pass amplifier vs spectral narrowing effect

### 3.4 实验模型估算

利用该程序对中国原子能科学研究院百焦耳级 KrF 准分子激光器“天光一号”改进型作了模拟估算。参数: 介质  $\gamma = 10$ , 长  $L = 124$  cm, 宽  $D = 28$  cm,  $g_0L = 10$ ,  $\beta_n = 0.01, 0.1$ , 双通式镜面反射  $R = 1$ 。由于该器件纵横比较大 ( $\approx 4.4$ ), 已抑制相当一部分放大自发辐射流。结果表明(表 1), 当入射光强由  $0.01 I_m \sim 0.1 I_m$  变化时, 其噪声比范围为  $8.21\% \sim 1.97\%$ 。故提高效率可增大驱动功率。配合增大  $\gamma$  等其它措施完全能够实现  $\eta_{ext} > 40\%$ 。

Table 1. Output intensity of KrF excimer laser made in 401

$I_{in}/I_m$	$I_{out}/I_{inc}$	$I_{ASE}/I_{out}$	$I_{ASE}/I_{out}$	$\eta_{ext}$
0.01	3.1563	0.2591	8.21%	31.46%
0.1	4.1782	0.0822	1.97%	40.78%

### 3.5 多级放大系统理论模拟

在高功率激光系统中主要关心的问题是使具有相应阶段增益的每一级放大器组合成一个放大系统。以获得高泵浦效率及输出功率。本文以三级放大系统作为模型, 该系统各参数值见表 2。

Table 2. Summary of three-staged amplifier specifications

	amp. 1(S)	amp. 2(D)	amp. 3(D)
diameter (cm)	3	10	26
length (cm)	40	70	100
gain ( $\%cm^{-1}$ )	15	10	10
gain to loss ratio	10	10	10

第一级为单通放大器, 第二、三级为双通放大器, 计算中各级之间用空间滤波器分离, 只有激光信号能通过, 且各级输出光束孔径与下一级输出光束孔径之间有严格的光学系统配置, 以获得好的光束质量, 图 5 给出了有和没有放大自发辐射情况下的输出光束分布, 可以看出, 当入射光强小于  $10^{-1} I_m$  时放大自发辐射才对系统总输出有影响。同时可以看出尽管第二、三级放大器较第一级放大器而言其纵横比较小, 导致放大自发辐射效应明显, 但其足够大的入射负载, 又使得这一效应的影响程度减弱。故而只要  $g_0L$  在最佳定标条件下, 高泵浦效率是可能的。

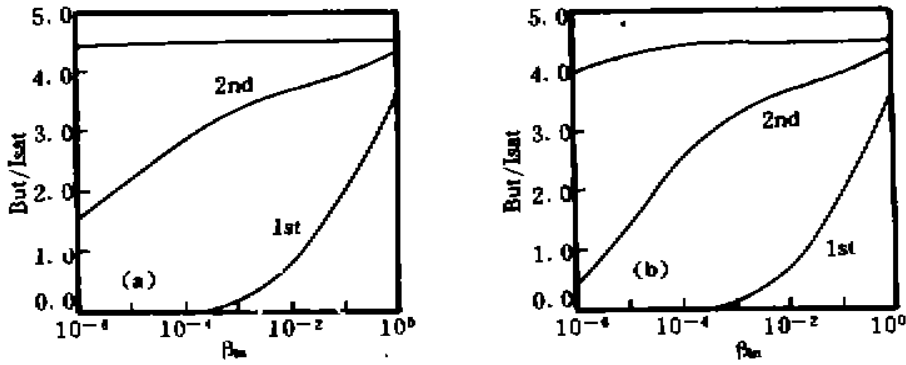


Fig. 5 Output intensity of a three-staged systems  
(a) without ASE, (b) with ASE

事实上入射负载通常是有一定非均匀性的，图 6 对非均匀入射负载下，输出光束的均匀性作了分析。计算发现，在最佳泵浦条件下，其输出光束均匀性得到改善。

### 4 总 结

1) 发展了以激光相干光为主含放大自发辐射效应的准分子激光放大器中的光传输理论模型。加入了自发辐射的频率分布效应及侧壁表面反射效应。

2) 编制了放大自发辐射的三维理论模型的计算程序。以均匀泵浦下圆柱对称性介质为模型来实现，对放大自发辐射自身单元辐射效应作了考虑。

3) 对小纵横比条件下，双通式激光放大器中，放大自发辐射对输出光强、功率增益及泵浦效率的影响作了具体分析。得到介质的最佳定标为：增益长度乘积 ( $g_0L$ ) 取 10；增益直径乘积 ( $g_0D$ ) 小于 3。

4) 结合中国原子能科学研究院百焦耳级 KrF 激光器作了理论估算。当入射光强由 0.01  $I_s \sim 0.1 I_s$  变化时，给出其噪声比范围在 8.21%  $\sim$  1.97% 之间。对三级放大系统作了模拟计算。说明当第一级入射负载  $\beta_{in} < 10^{-4}$  时，放大自发辐射才对系统输出有影响。证明了在非均匀入射负载情况下，输出光束均匀性可得到改善。为实验上改善光束质量提供了一定的理论数据。

本工作在完成过程中得到了徐锡申、陈栋泉研究员、刘希东、张路等同志的大力支持，在此一并表示感谢。

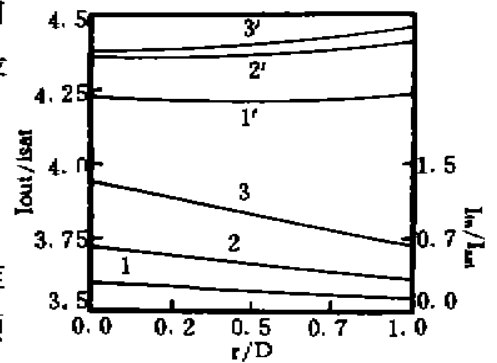


Fig. 6 Radial intensity distribution of double-pass output beams for a nonuniform in/out beam  
1, 2, 3- input beams, 1', 2', 3'- output beams

### 参 考 文 献

[1] A. M. Hunter, R. O. Hunter, Bidirectional amplification with nonsaturable absorption and amplified spontaneous emission. *IEEE, J. Quant. Electron.*, 1981, QE-17(9): 1879~1887  
 [2] D. D. Lowenthal, J. M. Eggleston, ASE effects in small aspect ratio laser oscillators and amplifiers with nonsaturable absorption. *IEEE, J. Quant. Electron.*, 1986, QE-22(8): 1165~1172  
 [3] A. Sasaki, K. Ueda, K. Kasuya, ASE in high power KrF lasers. *Appl. Phys.*, 1989, 65(1): 231~236

- [4] W. T. Leland, Amplified spontaneous emission produced by large KrF amplifiers. *Technical Review Volume 2*, (ICF at Los Alamos), 1989
- [5] 周炳琨等 激光原理. 北京, 国防工业出版社, 1984
- [6] 卢寿楠, 光学名词典. 北京, 国防工业出版社, 1988
- [7] 杜燕贻, KrF 准分子激光器中的 ASE 效应. *强激光与粒子束*, 1995, 7(2): 288~294

## Three-Dimensional ASE Effects in Excimer Laser Amplifiers

Du Yanyi

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

(Received 26 December 1994; revised 7 April 1995)

**Abstract** A three-dimensional program of amplified spontaneous emission (ASE) for high power KrF laser amplifiers with a cylindrical symmetry and small aspect ratio is developed. The analysis using the present program indicates that the optimum scaling of the transverse and the longitudinal gain-length product should be smaller than 3 and 10, respectively. Characteristics of the experimental device 100 J KrF laser and a three-staged amplifier system are calculated.

**Key words** excimer laser amplifiers, amplified spontaneous emission (ASE), extraction efficiency.