

# KrF 激光器空间非均匀抽运动力学模拟

张春斌 巫德章 张 路

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

单玉生 王乃彦

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

(2000 年 10 月 11 日收到 2000 年 11 月 1 日收到修改稿)

提出了模拟 KrF 激光器的三维动力学方法. 该方法与以往的动力学方法的主要区别在于考虑了电子束抽运的空间非均匀性. 即将电子束抽运速率作为空间各点  $(X, Y, Z)$  及时间  $(t)$  的函数. 用三维模拟方法对 96101702 实验进行了计算. 总的激光输出及镜面能量分布与实验符合相当好. 解决了以往模型理论明显高于实验的问题.

关键词: KrF 激光器, 三维动力学模型, 电子束抽运

PACC: 4255G

## 1 引 言

作为惯性约束核聚变驱动器的主要候选者之一, 近几年 KrF 激光器的研究在美、英、日等国家取得了较大进展. 尤其是美国海军实验室的 Nike 装置已于 1995 年建成并投入运行, 开展了激光靶吸收以及界面  $R-T$  不稳定性等物理实验, 其光束均匀性比一般现有的最好的玻璃激光器高一个数量级<sup>[1]</sup>. 作为激光惯性约束聚变国家高技术课题之一, 我国正在建造百焦耳级 KrF 激光 (master oscillator power amplifier, 缩写为 MOPA) 系统, 包括高质量前端 KrF 预放大器, KrF 主放大器以及用于编码和解码的角多路系统.

在以往的 KrF 激光器的动力学模型中, 或是将粒子密度 (包括光子密度) 视为在计算区内处处相同, 或是计入腔两端的反射镜将光子沿光轴方向传播分为左、右行光. 前者称为“零维”<sup>[2]</sup>, 后者称为“一维”<sup>[3]</sup>. 两种模型的共同前提是电子束抽运空间均匀. 上述理论模型的不合理性表现在两个方面: 一是电子束在激光腔中的能量沉积实际是空间不均匀的, 这种不均匀有时是很明显的. 从我们关于双向四电子束抽运能量沉积的研究<sup>[4]</sup>可以看出, 电子束抽运空间不均匀是不能忽略的. 另一方面, 在抽运空间均匀前提下, 理论计算的激光输出能量往往偏高, 必须引入自由参数 (free parameters) 才能与实验相符合. 文献 [3] 也指出一维计算的结果比实验高得多 (图 1).

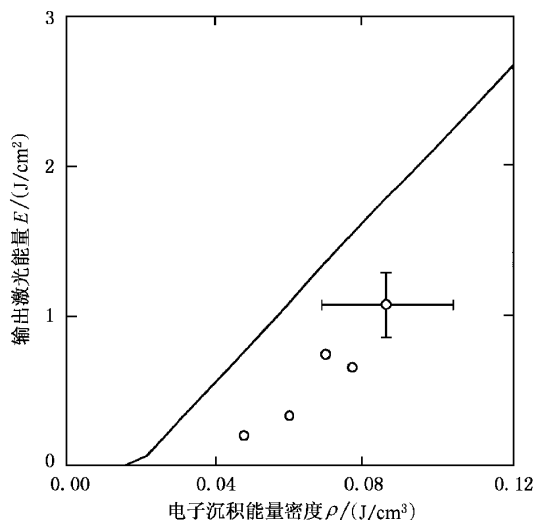


图 1 输出激光能量  $E$  与电子沉积能量  $\rho$  的关系.  $\circ$  为实验点; — 为一维计算的结果

基于上述原因, 我们提出一种三维模型. 基本解决了理论模拟计算远高于实验的问题. 由于计算的复杂性, 相当费时, 目前在亿次机上算一个结果约需近百个小时. 下面对三维模型的主要内容、96101702 实验模拟结果作简要叙述.

## 2 三维模型

### 2.1 基本方程

激光腔内动力学过程可用粒子的速率方程组,

电子分布函数的 Boltzmann 方程以及光子的传输方程联合描述.

粒子速率方程(含电子数密度)

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_{\alpha} R(\alpha) [v(\alpha) - \mu(\alpha)], \quad (1)$$

Boltzmann 方程(电子分布函数  $f$ )

$$\begin{aligned} & u^{1/2} f(u) \frac{dn_e}{dt} + \frac{dJ(u)}{du} + \frac{dJ_e(u)}{du} + \frac{dJ_{ee}(u)}{du} \\ &= S_0 \delta(u) + s(u) + n_e \sqrt{\frac{2e}{m}} \{ \delta(u) \sum_i N_i \\ & \cdot \int_0^\infty du u f(u) Q_i(u) + \sum_{\alpha} (u + u_{\alpha}) f(u + u_{\alpha}) \\ & \cdot N_{\alpha} Q_{\alpha}(u + u_{\alpha}) - u f(u) N_{\alpha} Q_{\alpha}(u) \\ & + (u - u_{\alpha}) f(u - u_{\alpha}) N_{\alpha}^* Q_{-\alpha}(u - u_{\alpha}) \\ & - u f(u) N_{\alpha}^* Q_{-\alpha}(u) \}, \end{aligned} \quad (2)$$

光子传输方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial N_{ph}^{\pm}}{\partial t} \pm c \frac{\partial N_{ph}^{\pm}}{\partial z} = c N_{ph}^{\pm} (g - \alpha) \\ & + \frac{\Omega_{\pm}}{4\pi} \frac{N_{Krf}^*}{\tau_s} + \text{注入源}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $N_i$  ( $i=1, \dots, 28$ ) 为粒子数密度;  $R(\alpha)$  为速率系数;  $\alpha$  为反应标号;  $N_{ph}^{\pm}$ ; '+' 表示右行光; '-' 表示左行光;  $\tau_s$  为  $KrF^*$  的平均辐射寿命; 注入源, 当计算振荡器时, 该项为零. 关于 Boltzmann 方程, 符号说明较多, 可见文献 [5].

## 2.2 对上述方程的说明

1) 粒子密度  $N_i$ , 光子  $N_{ph}$ , 速率系数  $R$ , 以及  $g, \alpha$  均为  $X, Y, Z, t$  的函数. 由 3D-MC 计算的电子束的能量沉积空间分布及电子束流的电流、电压时间波形给出抽运速率的空间和时间相关.

2) 光子沿轴向传输(左、右行光).

3) 粒子速率方程中不含扩散项, 原因是在激光腔动力学过程中, 粒子扩散可以忽略. 例如,  $Kr$  原子与 0.5 MeV 电子相碰, 因动量守恒所得速度为  $10^4$  cm/s, 在腔动力学过程 100 ns 内, 其位移约为  $10^{-3}$  cm, 腔内温度比室温约高 100 K. 热运动可不计. 对于电子, 高能电子在 3D-MC 中已计入空间传输, 次级电子扩散可忽略.

激光光子只考虑沿  $Z$  轴的传输, 因为  $XY$  平面分区约为 1 cm, 腔长约为 100 cm,  $\lambda = 248$  nm. 所以菲涅耳数  $N = \frac{1}{\lambda L} \approx 10^3$ . 即在腔内可不计入衍射.

## 2.3 流程图和网格划分

图 2 和图 3 是三维动力学解法的流程图和空间网格划分. 因为电子束抽运是镜面对称的, 所以只需计算腔的 1/4 空间. 粒子数方程共 28 个, 粒子数方程用 Gear 方法求解. 步长  $dt$  是由收敛精度决定的, 在动力学过程中是可变的, 光子传输方程的步长  $\Delta t = \Delta Z/c$  是由轴向网格大小决定的.

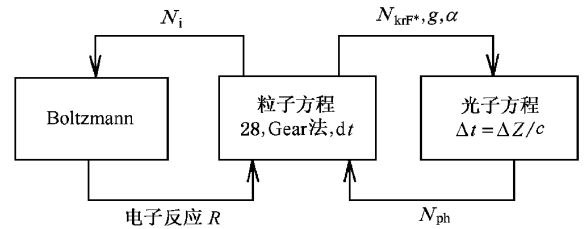


图 2 流程图

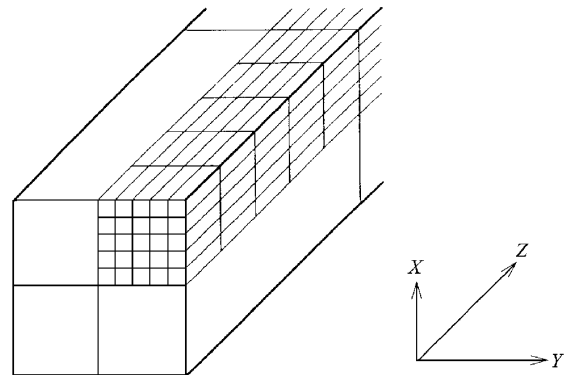


图 3 镜面反射对称

## 3 计算结果

将上面给出的三维动力学模型应用于计算 96101702 实验. 由二极管的电子束流电流、电压时间波形, 按电子束能谱抽样, 进行 3D-MC 能量沉积的模拟计算结果, 总沉积能量及三维空间分布. 与三维动力学耦合, 可得到激光腔内各粒子数密度空间、时间分布以及最终的输出耦合镜面的激光能量分布并积分出总的能量. 图 4 是光子数密度的  $XZ$  及  $YZ$  面上的某时刻分布. 其中下方为左行光, 上方为右行光. 图 5 是激光能量的镜面分布.

对空间网格划分进行了考察, 分别对  $10 \times 10 \times 10$  和  $20 \times 20 \times 20$  进行了计算, 发现总能量相差不大, 但后者的能量镜面分布更接近实验(如“马鞍型”

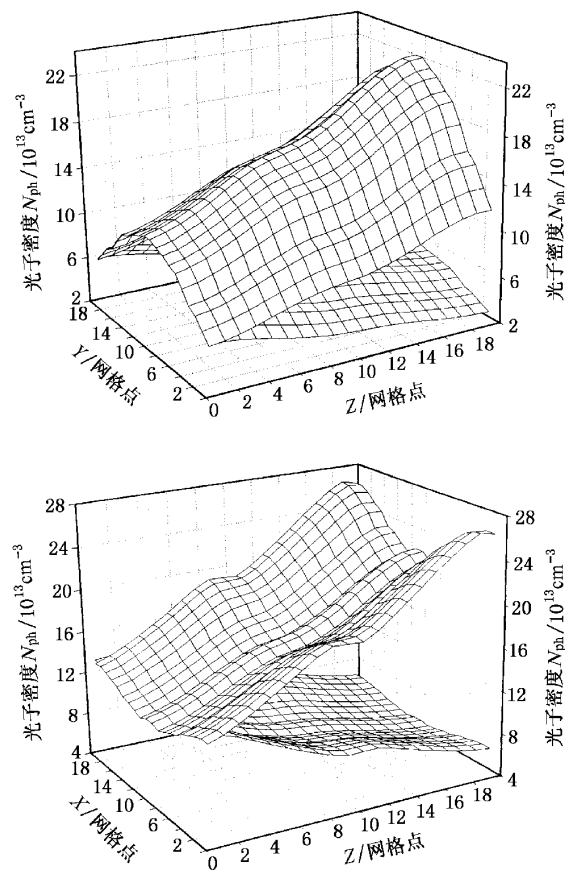


图 4 光子数密度分布

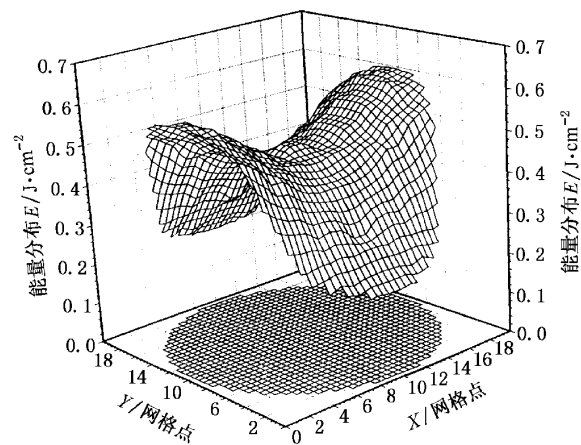


图 5 激光能量的镜面分布

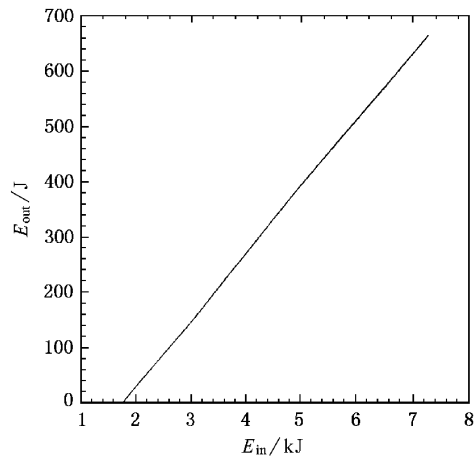


图 6 0-D 计算的激光输出能量  $E_{out}$  与电子能量沉积  $E_{in}$  的关系

原因是对激光的抽运有一个阈值.由图 1 知,这个阈值约为  $0.02\text{ J/cm}^3$ .在 3-D 模拟中,有相当一部分能量沉积在非电子束直穿的空间.(而在 0-D 或 1-D 模拟中均认为是非抽运区).当这种能量低于阈值时,对激光不起作用.而当能量高于阈值时,又是与激光能量成线性关系.0-D 计算所有沉积能量均参与平均,对激光均起作用.所以 3-D 计算应该比 0-D 低.

4 结 论

我们提出的考虑了空间抽运不均匀的三维动力学模型比较客观地反应了激光腔的物理过程,因而计算结果比较接近实验,克服了原来零维和一维模型计算偏高的问题.将实测的二极管电压、电流时间波形以及 3D-MC 方法计算的电子束能量沉积与三维动力学模型结合起来能够对 KrF 激光器的物理过程进行较精确的模拟计算.

中间的小丘).  
实验总能量为 348 J,3-D 动力学计算为 340 ~ 380 J,0-D 动力学计算为 600 J(由图 6 得到,电子束能量沉积为 7.1 kJ).  
可见 3-D 动力学计算与实验符合较好,而 0-D 明显偏高.为什么 3-D 与 0-D 差别如此之大?主要

[ 1 ]

C.J.Pawley , K . Gerber , R. . H. Lehmberg , E. A. Mclean ,  
A. N. Mostovych ,*Phys. Plasma* , **4** ( 1997 ) , 1969.

[ 2 ]

T. H. Johnson , A. M. Hunter , *J. Appl. Phys.* , **51** ( 1980 ) ,  
2406.

[ 3 ]

S. J. Ctuchlewski , D. E. Hanson , B. J. Krohn , A. R. Larson ,  
E. T. Alesky , *Fusion Technology* , **11** ( 1987 ) , 560.

[ 4 ]

C. B. Zhang *et al.* , *Chin. J. Laser* , **A24** ( 1997 ) , 774 ( in  
Chinese ) [ 张春斌等 , *中国激光* , **A24** ( 1997 ) , 774 ].

[ 5 ]

C. B. Zhang *et al.* , IAPCM Report 971-16 ( 1997 ) [ 张春斌等 ,  
IACP 报告 971-16 ( 1997 ) ].

KINETIC MODEL FOR SPACE NONUNIFORM PUMP IN A KrF LASER

ZHANG CHUN-BIN   WU DE-ZHANG   ZHANG LU

( Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics , P. O. Box 8009 , Beijing   100088 , China )

SHAN YU-SHENG   WANG NAI-YAN

( China Institute of Atomic Energy , P. O. Box 275-7 , Beijing   102413 , China )

( Received 11 October 2000 ; revised manuscript received 1 November 2000 )

ABSTRACT

A three-dementional( 3D ) kinetic model method for KrF laser is presented. The major difference between the method and the previous kinetic method for KrF laser is that the space nonuniform for the electronic pump is considered. The pump rate is considered as a function of 3D space(  $X, Y, Z$  ) and time(  $t$  ). Using the 3D model method , 96101702 experiment is simulated . The calculated laser energy output and lens energy distribution is in agreement with the experi- mental results. The problem that the calculated result of 1D model is obviously higher than the experimental result is solved.

**Keywords :** KrF laser , three dementional model , electronic beam pump

**PACC :** 4255G