

双向四电子束泵浦 KrF 主放大器能量沉积*

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)

提要 用三维电子输运 Monte-Carlo (MC) 方法研究了双向四电子束泵浦 KrF 准分子激光器 MOPA 系统中主放大器(H1M)的能量沉积空间分布。计入了 Hibachi 结构和主膜的影响。对 0.5 MeV 的电子,泵浦方向能量沉积基本均匀,而在轴向,因为两窗口间的 14 cm “死区”使得能量沉积呈“马鞍形”,峰谷比为 2~3。给出了能量沉积的总量及能量沉积效率与电子束能的关系曲线,为 Marx 发生器的二极管电压进行优化设计提供了依据。

关键词 电子束泵浦, KrF 激光, 能量沉积

影响电子束泵浦 KrF 激光器的激光效率及光束质量的首要因素之一是高能电子束在激光腔中的能量沉积效率和空间分布。高能电子束自阴极发射,经阳极膜,穿透主膜支撑结构(Hibachi)及主膜,进入激光腔与混合气体之原子发生碰撞,使原子离化或激发,因而造成电子束在气体中的能量沉积。为了提高激光器的总效率,应该尽量提高电子束对膜及 Hibachi 的穿透,提高在腔中能量沉积的总量。这是 KrF 激光器的一个重要课题。为此进行了一系列研究。L. A. Rosocha 等^[1]研究了 Aurora LAM 的电子束总的穿透效率,即进入气体介质中的份额。M. J. Shaw 等^[2]用二维 MC 方法给出了两种 Hibachi 结构的能量沉积效率,并给出只适用于一定的腔体结构的模拟公式。文献[3]用较简化的 MC 方法,对矩形电子束在激光腔中的能量沉积进行了研究,未计主膜及 Hibachi 的影响。

关于电子束对膜、Hibachi 的穿透、腔中能量沉积效率,是与电子束的能量、膜的材料与尺寸、Hibachi 的实际结构以及激光腔的尺寸都有密切关系的,所以必须综合考虑。

我们用三维电子-光子耦合输运的 Monte-Carlo 方法,对包括 Hibachi 和主膜在内的 H1M 的电子能量沉积进行了研究。下面分别对方法、与其它文献的结果比较、能量沉积与电子能量的关系、激光腔电子能量的空间分布等加以描述。

1 计算方法

由于电子与物质的相互作用比较复杂,对于一般几何条件下解析求解或通常的数值求解电子输运方程是很困难的,而 Monte-Carlo 方法则是可行的。因为电子为带电粒子,在物质中运动将受到长程库仑力的作用。在与原子的碰撞过程中,每次碰撞损失的能量很小。例如光子

* 国家高技术惯性约束聚变主题资助。

的 Compton 散射, 能量从几个 MeV 降到 50 keV 仅需 20~30 次, 而电子能量从 0.5 MeV 降到 0.25 MeV 约需 10^4 次。所以按碰撞的次数来模拟不大可能, 于是采用所谓压缩历史法 (condensed history), 即对电子随机过程模拟的每一步包含了若干次电子与物质的相互作用过程。

在我们的 MC 方法中, 电子与物质的相互作用考虑了如下物理过程, 即电子-电子碰撞 (入射电子与介质中自由电子或原子外壳层电子的碰撞)、电子韧致辐射、原子离化以及离化弛豫。当入射电子进入介质时, 将根据各物理过程相应的碰撞截面及相应的散射角分布进行跟踪, 同时每一过程均伴随着能量交换。关于上述各物理过程的能量微分截面, 伴随的能量交换, 以及电子的散射角的理论描述, 可参见文献 [4~6]。MC 方法对电子全过程的跟踪是相当复杂的。因为在计算电子能量沉积时, 原子离化过程起主要作用, 其余过程对能量沉积的贡献均小于 1%。下面只简要描述电子与原子的碰撞离化过程。

当电子与原子内壳层电子碰撞时, 可以使某壳层中的电子被击出, 产生一空穴, 即原子被离化。 i 壳层电子的离化能为 E_i , 入射电子能量为 E_0 , 则出射电子能量为 $E = E_0 - E_i$, 在离化过程中, 认为初始电子能量完全交给出射电子。

能量损失 (单位路径上, 入射电子与原子壳层电子碰撞而损失的能量) 为

$$- \frac{dE}{dx} = \frac{C}{\beta^2} \left[\ln \frac{T^2(T+2)}{2 \left[\frac{I}{m_e c^2} \right]^2} + F(T) - D \right] \quad (1)$$

$$F(T) = \frac{\left[\frac{T^2}{8} - (2T+1) \ln 2 + 1 \right]}{(T+1)^2} \quad (2)$$

这里, $T = \frac{E_0}{m_e c^2}$; 常数 $C = 2\pi N_0 r_e^2 m_e c^2 \cdot \frac{Z}{A} \rho$, c 为光速, ρ 为物质密度, N_0 为阿佛加德罗常数; I 为平均原子激发能, 按 Sternheimer 的经验公式

$$I = 9.76Z + 58.8Z^{-0.19} \text{ (eV)} \quad (3)$$

D 为等效密度修正,

$$D = \begin{cases} 0 & X < x_0 \\ 2X \ln 10 + b + a(x_1 - x)^m & x_0 \leq X < x_1 \\ 2X \ln 10 + b & X \geq x_1 \end{cases} \quad (4)$$

$$X = \frac{1}{2 \ln 10} \ln \frac{\beta^2}{1 - \beta^2} \quad (5)$$

x_0, x_1, b, a 为参量, 由理论计算及平均激发能 I 给出。

离化截面 σ 是一入射电子在单位路径上与原子壳层电子发生碰撞产生自由电子的数目。

根据 Gryzinsky 半经验公式, 在混合介质中,

$$\sigma_{ij} = \frac{W_j}{A_j} \frac{n_i \pi r_e^2 (m_e c^2)^2}{E_i^2} \left[1 + \frac{2}{3} \left[1 - \frac{y}{2} \right] \ln \left[2.7 + \left[\frac{1}{y} - 1 \right]^{1/2} \right] \right] \cdot \left[\frac{\beta_i^2}{\beta^2} \left[\frac{1 - y}{1 - \beta_i^2 + \beta_i^2 \beta^2} \right]^{3/2} \right] \quad (6)$$

W_j 为元素 j 的重量比; A_j 为元素 j 的原子量; n_i 为第 i 壳层的电子数密度; $\beta_i = v_i/c$, 是能量为 E_i 的壳层电子的相对论因子; $y = E_i/E_0$, $\beta = v/c$, 是能量为 E_0 的入射电子的相对论因子。

2 方法检验

给出了两个对照计算结果。一个是不带引导磁场的双向泵浦, 一个是带引导磁场(4kG)的单向泵浦。

图 1 中两条线分别表示矩形电子束中心和边缘的能量沉积分布, 文献[1]中图 10 相应于图 1 中的上面一条曲线。图 2 中上下两条曲线也是分别对应于中心和边缘。文献[4]给出了 3D-MC 计算和实测结果, 可见, 计算的结果较[7]中 MC 计算要低, 但与实验更接近一些。

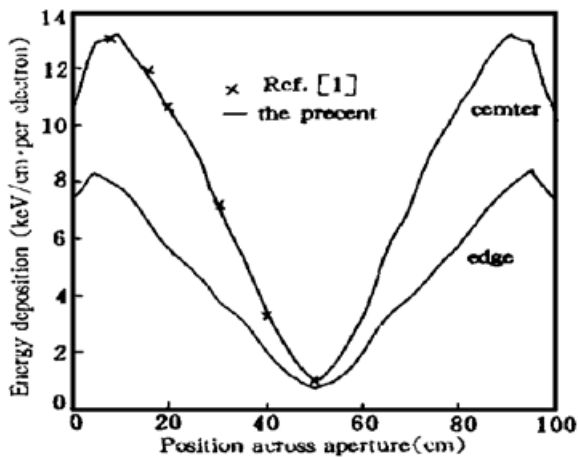


图 1 双向泵浦计算结果与[1]比较

Fig. 1 Comparison of the calculated results for bidirectional pump with [1]

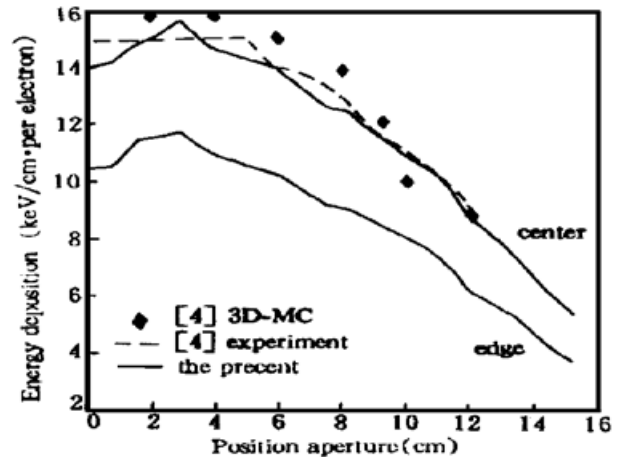


图 2 单向泵浦(4kG 引导磁场)计算结果与[7]比较

Fig. 2 Comparison of the calculated results for simple direction pump (4kG applied guide magnetic field) with [7]

3 HIM 能量沉积

计算的 HIM 模型, 腔体尺寸为 $27 \times 27 \times 123$ (cm), 电子束窗口为两个 47.5×20 (cm) 的矩形孔, 腔内 $\text{Ar}/\text{Kr}/\text{F}_2$ 气分比为 0.896/0.1/0.004, 压力为 0.2 MPa。

作为气体腔主膜的支撑结构(Hibachi)是一个铁制栅栏, 其结构设计原则是, 既能满足在几个大气压下主膜不被破坏, 同时又要尽量少挡住电子进入气体腔。

我们在模拟计算中, 取条幅宽与厚(电子束方向)为 0.2×0.5 (cm), 条间距为 1.79 cm。压力箔为 Ti, 其厚度为 0.0035 cm。定义电子束泵浦方向为 x 方向, 激光传播方向为 z , 双向四束是在腔两侧两两相对, 同一边的两电子束窗口中间间隔 14 cm(见图 3)。

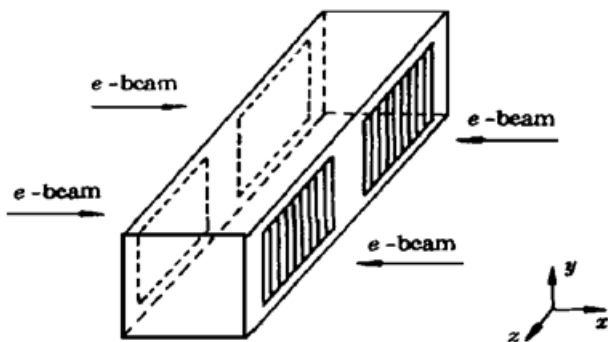


图 3 HIM 电子束泵浦示意图

Fig. 3 Schematic of HIM by electron beams

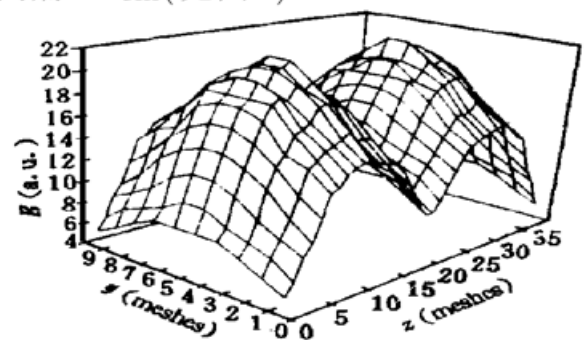


图 4 能量沉积空间分布 ($y-z$ 平面, x 中心)

Fig. 4 Spatial profile of the energy deposition ($y-z$ plane, x centre)

3.1 电子束能量沉积的空间分布

图 4~ 6 分别为 $y-z$, $x-z$ 和 $x-y$ 平面的能量沉积空间分布。可以看到, 当电子束能量为 0.5 MeV 时, 双向四束泵浦在激光腔中所形成的空间能量分布仍存在明显的不均匀性。

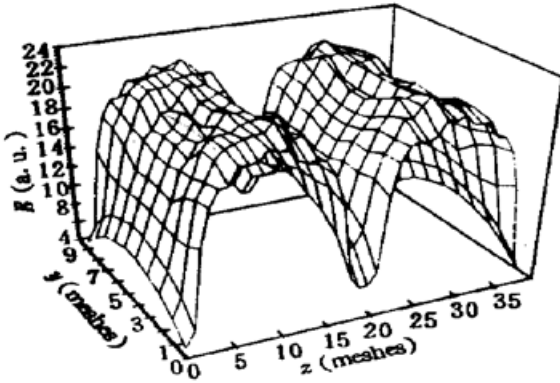


图 5 能量沉积空间分布 ($x-z$ 平面, y 中心)
Fig. 5 Spatial profile of the energy deposition ($x-z$ plane, y centre)

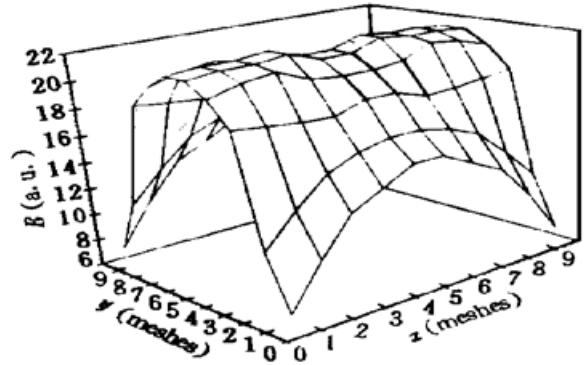


图 6 能量沉积空间分布 ($x-y$ 平面, $z = 1/4$ 腔长)
Fig. 6 Spatial profile of the energy deposition ($x-y$ plane, z quarter)

在轴向有“马鞍形”, 除两端各有一“死区”外, “马鞍形”的高峰与底部的峰谷比, 在中心约为 2, 在边缘约为 3。

沿 x 方向(电子束方向), 正对电子束窗口中心处, 能量分布已拉平, 只是在两窗口之间区域, 中心比边缘高出一倍, 这是由于电子散射的结果。而在上下两边缘(即 y 为边缘), x 方向中心与边缘能量之比, 各处均为二倍。

激光腔沿 y 方向(垂直于电子束和激光方向) 能量的分布情况为: 正对电子束窗口, 当 x 为边时, y 中心约为边缘的 3 倍; 当 x 为中心时, y 中心约为边缘的 1.5 倍。

从整个腔的分布看, 最高峰与两窗口之间最低点之比约为 5, 而与两端最低点之比可达 10。[6] 给出了更详细的结果。

3.2 电子束沉积总能量和效率与电子束能量的关系

我们对 HIM 的激光腔结构及 Hibachi、主膜结构, 计算了一系列电子束能情况下, 腔内总能量沉积以及能量沉积效率(见图 7)。对于总的沉积能量, 当电子能量为 0.5 MeV 时, 沉积总能达最大, 而能量沉积效率则当电子束能为 0.31 MeV 即达最大。从能量沉积效率看, 0.2 MeV 的电子优于 0.6 MeV 的电子。当然, 从能量沉积的均匀性看, 0.2 MeV 要比 0.6 MeV 差。从每个电子能量沉积的总量看, 电子能量由 0.5 MeV 增至 0.6 MeV 反而是不利的。但是, 如果因提高二极管电压而较大地增加电子束的电流, 则对提高能量沉积功率密度是有明显好处的。所以在一定的结构下, 确定沉积能量最大值所对应的电子束能, 就可以对 Marx 发生器的二极管进行优化设计。

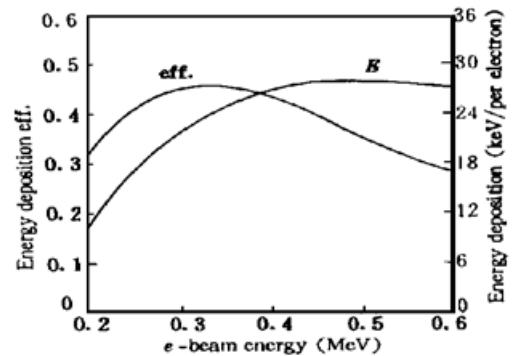


图 7 总沉积能和能量沉积效率与电子束能的关系
Fig. 7 Relation of the total deposition energy and the energy deposition efficiency with the e-beam energy

4 讨 论

通过对双向泵浦的 MOPA 系统主放大器(HIM)能量沉积的研究,得出了在 HIM 腔中能量沉积的空间分布。当电子束能为 0.5 MeV,在 z 轴方向的“马鞍形”峰谷比为 2~3。而 x 方向,即电子束方向,0.5 MeV 电子可得到较均匀的泵浦。在电子束中心方向能量沉积相当平,这是双向泵浦的最大优点。电子束在腔中总的沉积能量以及能量沉积效率是与电子束能(即二极管电压)密切相关的。两条曲线都不是单调上升的,而是有一峰值。这一结果是由 HIM 腔体结构决定的。[1]中给出的沉积能量与电压的 $5/2$ 次方成比例,这是由于 LAM 的腔体积为 $100 \times 100 \times 200$ (cm),进入腔内的电子很少逃出。

关于电子束自磁场引起的箍缩效应,以及二极管阴极发射电子的散射效应,本文没有考虑,这些问题将进一步与实验工作配合,给出某种合理的修正。目前,我们是根据有关文献的结果^[1],计入自磁场的影响而得到最后的能量沉积效率。

参 考 文 献

- 1 L. A. Rosocha, K. B. Riepe. Electron-beam sources for pumping large aperture KrF lasers. *Fusion Technology*, 1987, **11**: 576
- 2 M. J. Shaw *et al.*. Rutherford Application Laboratory Annual report to the laser facility Committee, 1981, RL-81-040, 2. 29~ 2. 34
- 3 高军思,单玉生,龚 坤. 矩形电子束在激光腔中的能量沉积. *强激光与粒子束*, 1991, **3**: 464
- 4 J. A. Halbleib, T. A. Mehlhorn. ITS: The Integrated TIGER Series of Coupled Electron/photon Monte Carlo Transport Code SAND 84-0573 (November 1984)
- 5 H. M. Colbert. SANDYL: A Computer Program for Calculating Combined Photo-electron Transport in Complex Systems SLL-74-0012, 1974, 5
- 6 张春斌,巫德章,张 路. 电子束激发 KrF 激光器的 MC 模拟. IAPCM 报告, 1996
- 7 A. Mandl, E. Salesky. Electron beam deposition studies of the rare gases. *J. Appl. Phys.*, 1986, **60**: 1565

Electron Energy Deposition for KrF Laser with Bidirectional Four e -beams Pump

Zhang Chunbin Wu Dezhang Zhang Lu

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

Abstract The spatial profile of the energy deposition for the main amplifier (HIM) of a KrF laser MOPA system is presented by means of 3D Monte-Carlo method. The effects of Hibachi structure and main foils are considered. For 0.5 MeV electron, the energy deposition distributions of pumping direction are almost uniform. In the lasing direction (axial), because of a 14 cm unpumped area between two e -beam windows the spatial profile of energy deposition takes the shape of a saddle. The peak-valley ratio is 2~3. In addition, the relations of the total deposition energy and the energy deposition efficiency with the e -beam energy are given. The total deposition energy and the energy deposition efficiency reach the maximum when the e -beam energy is equal to 0.5 MeV and 0.31 MeV, respectively.

Key words e -beam pump, KrF laser, energy deposition