

多段阵列式钷玻璃放大器几何构形的研究*

冯国英 吕百达

郑万国

(四川大学激光物理与化学研究所 成都 610064)(中国工程物理研究院核物理与化学研究所 成都 610063)

提要 基于闪光灯和钷玻璃的实验数据,用光线追迹和蒙特卡罗法建立了多段阵列式钷玻璃放大器(MSA)的泵浦模型。模拟结果表明光传输效率和储能密度分布随 MSA 的几何尺寸和构形而变。

关键词 阵列式放大器(MSA),钷玻璃放大器,光线追迹

多段阵列式放大器(MSA)是新一代惯性约束聚变激光驱动器的关键部件之一。其中,激光增益介质磷酸盐钷玻璃是表面形状为矩形的有一定厚度的片,与激光束传输方向呈布儒斯特角放置,片的排布为 $m \times n \times k$ (分别为水平方向、垂直方向和在激光传输方向的片数),片的两侧被脉冲氙灯列阵泵浦。MSA 与普通的泵浦腔设计不同,应正确考虑多根闪光灯和多段激活介质的几何排布、泵浦腔的几何形状以及建立合理的物理模型。

1 计算模型

氙灯的发光特性主要取决于电流强度,也与氙灯内径和管内充氙气的压强有关。H. T. Powell 等人建立了氙灯辐射模型^[1],有效范围为:脉冲持续时间 $10 \mu\text{s} \leq \tau \leq 10 \text{ms}$,电流强度 $300 \leq J \leq 10^4 \text{A/cm}^2$,氙灯内径 $0.2 \sim 2 \text{cm}$ 。闪光灯的谱辐射能流密度 $I(\lambda)$ 可表示为

$$I(\lambda) = I_{BB}(\lambda, T) F[\alpha(\lambda) d] \quad (1)$$

式中, I_{BB} 为等离子体温度 T 下的黑体辐射; $F[\alpha(\lambda) d]$ 为角度平均辐射函数,它是用 Trenholme 和 Emmett 的扩展多项式^[2]计算出来的。

与实验数据符合很好的闪光灯等离子体温度 T 与灯内电流强度(以 kA/cm^2 为单位,用 j 表示)、灯内径(以 cm 为单位,用 d 表示)和氙气填充压强(以 $\times 133 \text{Pa}$ 为单位,用 p 表示)的函数关系可表示为

$$T = 9300j^{0.18} d^{0.092} p^{-0.017} \quad (2)$$

这里, T 以绝对温度表示。

与波长有关的吸收发射系数 $\alpha(\lambda)$ 是宽带连续曲线 $\alpha_c(\lambda)$ 与分离线组合 $\alpha_l(\lambda)$ 之和乘上一个共同的比例因子 $M(j, d, p)$:

$$\alpha(\lambda) = [\alpha_c(\lambda) + \alpha_l(\lambda)] M(j, d, p) \quad (3)$$

* 惯性约束聚变青年科学基金和国家高技术惯性约束聚变委员会资助项目。

放大因子 $M(j, d, p)$ 以带有修正的功率律比例形式依赖于闪光灯运转参数:

$$M(j, d, p) = \exp[1.57\ln(j) + 0.071\ln^2(j) + 0.19\ln(d) + 0.46\ln(p)] \quad (4)$$

本文所用的氙灯辐射谱和氙灯吸收谱是利用该模型, 当氙灯直径 $d = 1.5 \text{ cm}$, 氙灯内压强 $p = 39.9 \text{ kPa}$, 输入功率 $P_m = 20.1 \text{ kW/cm}^2$ 时进行计算后得到的。氙灯表面的辐射可看成是朗伯辐射光源, 我们引入蒙特卡罗法描述氙灯表面向 4π 空间随机发射光线^[3], 光线在氙灯表面的出射方向和携带的能量统计上具有朗伯辐射特性。氙灯等离子体对泵浦光的吸收与光线穿过等离子体的长度有关, 出射的泵浦光由于氙灯等离子体对不同波长的吸收不同, 光谱成分发生改变。

氙灯发出的光能中, 只有能够进入工作物质并且处于共振吸收带内的一部分光才能被吸收, 对增益有贡献。我们用罗仑茨函数拟合了 M93-N21-22 型磷酸盐钽玻璃的吸收谱, 与实验测得值^[4]符合很好。

MSA 中的钽玻璃片是与激光传输方向成布儒斯特角竖直放置的, 可在垂直于氙灯轴线的水平方向截面上和过氙灯轴线的垂直方向截面上分别进行二维光线追迹。在光线追迹过程中, 当泵浦光线的反射次数大于 20 次时(由于反射损耗, 能量已衰减到很小)或当泵浦光线穿过片时, 即停止对它的追迹。

程序的编制是相当复杂的, 应当全局考虑氙灯辐射光谱和钽玻璃的吸收谱, 氙灯等离子体对泵浦光的吸收谱, 泵浦光被腔壁反射时的能量损耗, 光在片表面的菲涅尔反射损耗, 不同光谱成分的光线在钽玻璃片内行进时能量被吸收以及量子效率等问题, 本文不作详细叙述。值得指出的是, 我们进行二维追迹的光线不仅携带能量信息, 而且由氙灯表面出发时统计上符合朗伯辐射规律(必须引入蒙特卡罗法), 光线还带有光谱信息, 光谱的相对分布是与氙灯的内径、灯内电流强度和灯内压强有关(根据 H. T. Powell 等人建立了氙灯辐射模型), 若光线穿过氙灯等离子体, 其光谱成分的改变随穿过的距离的不同而不同, 携带不同光谱成分的光线的能量在钽玻璃内的吸收情况和量子效率是不同的。由于蒙特卡罗法的计算精度与 $N^{-1/2}$ 成正比, 我们对下述 8 种单边被泵浦情况的每一种均进行了 6×10^5 条光线追迹, 光线的反射次数最大为 20 次, 结果的重复性很好。因此, 我们所进行的计算模拟较通常意义的光线追迹更接近氙灯对钽玻璃片泵浦的物理实质。

由于 MSA 在垂直方向上有很好的对称性, 光分布均匀, 本文对此方向也不作讨论。

我们利用计算模拟程序重点研究了 MSA 的构形对水平方向储能密度和增益均匀性的影响。为了达到较高的泵浦腔光传输效率和储能分布均匀性, 在阵列两边缘采用双渐开线形反射器^[5]。为了提高计算速度, 将每张钽玻璃片的单边被泵浦情况分别示于图 1(a) ~ (h)。图 1(a) ~ (d) 是钽玻璃片被边缘氙灯列阵泵浦的情况, 图 1(e) 和(f) 是钽玻璃片被中间氙灯列阵泵浦的情况。图 1(a) 和(e) 是片两端均处于非端头位置, 泵浦光不会从两端漏出, 在程序中的考虑即是两端的反射率 $R = 100\%$ 。图 1(b), (c), (f) 和(g) 是片的某一端处于端头位置, 泵浦光从此端头漏出, 在程序中的考虑即是反射率 $R = 0$, 而在另一端, 反射率 $R = 100\%$ 。图 1(d) 和(h) 是 MSA 在光传输方向上仅有一片钽玻璃的情况, 片的两端均处于端头位置, 泵浦光从两端都要漏出, 在程序中这两端头的反射率 $R = 0$ 。MSA 中任意位置处的钽玻璃片的被泵浦情况均可用其中的一种或两种叠加而成, 如非端头且非边缘处的片的被泵浦情况可由图 1(e) 的结果组合得到。边缘且端头处的片可由图 1(b) 和(c) 的结果组合得到。在光传输方向上仅有一片钽玻璃的 MSA 的中间位置的片被泵浦情况可由图 1(h) 的结果组合得到。

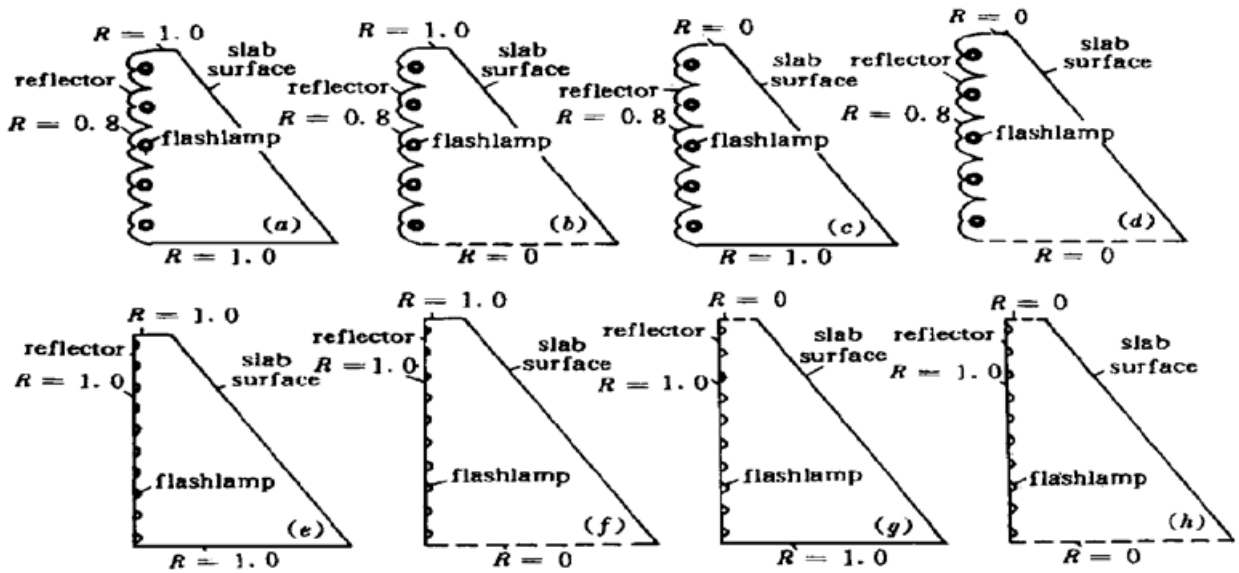


图 1 钕玻璃片被泵浦的 8 种情形

Fig. 1 Eight pumping cases of the Nd-glass slab

2 数值计算结果

对双渐开线形聚光腔,在不考虑放大自发辐射(ASE)的情况下,用光线追迹程序计算得到的单边的储能密度随片厚度和通光孔径面积变化的计算结果如图 2 所示,结果表明,薄片具有较高的储能密度,厚片具有较高的储能及效率。

表 1 图 2 所示反射器的泵浦腔光传输效率和储能效率比率

Table 1 The transfer efficiency and stored energy ratio of the pumping reflectors shown in Fig. 2

	transfer efficiency (%)	stored energy ratio
reflector in Fig. 2 (a)	85	1.42 ∙1
reflector in Fig. 2 (b)	65	1.10 ∙1
reflector in Fig. 2 (c)	82	1.40 ∙1
reflector in Fig. 2 (d)	63	1.09 ∙1
reflector in Fig. 2 (e)	80	1.11 ∙1
reflector in Fig. 2 (f)	51	0.69 ∙1
reflector in Fig. 2 (g)	72	1.01 ∙1
reflector in Fig. 2 (h)	49	0.68 ∙1

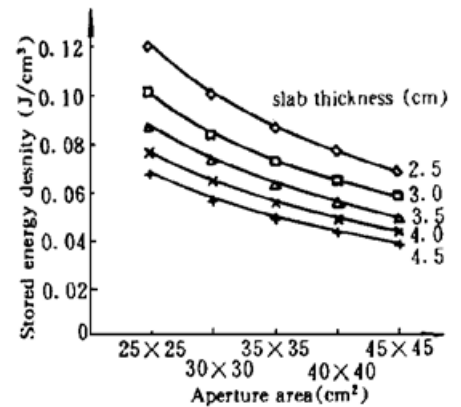


图 2 计算所得片的储能密度随板条不同横向尺寸和厚度的变化

Fig. 2 Calculated stored energy density vs slab thickness and aperture area

计算所得图 1 中的 8 种情形的反射器的泵浦腔光传输效率和储能与普通平板反射器(非端头的)的对应值之比列于表 1。由表 1 可见,无论是中间还是边缘处,端头处片的光传输效率和储能效率均小于非端头处的片,在开口大的一边泵浦光从端头溢出较多,影响了泵浦光分布的均匀性。由于中间灯列阵的氙灯密度为边缘灯列阵的 2 倍,且灯之间没有加入小的菱形反射器来避免灯之间的直接辐射,所以,其光传输效率(80%)较有双渐开线形反射器的边缘灯列阵的低。当对同样边缘灯密度的非端头的平板形泵浦腔作数值模拟后可知,光传输效率为 71%,较中间灯列阵的低。

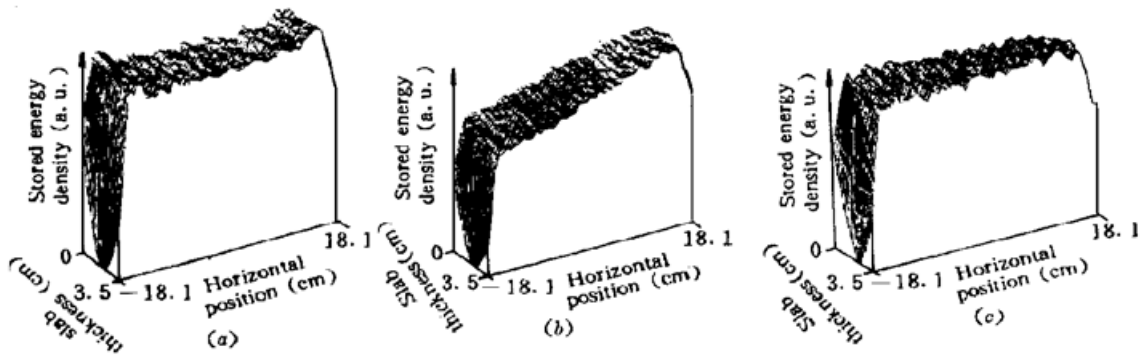


图 3 (a) 非边缘非端头处的片、(b) 非边缘端头处和(c) 单片长的 MSA 的非边缘处的片的相对储能密度分布图

Fig. 3 The relative stored energy density distributions of (a) the middle slab, which is not located at the end, (b) the middle slab, which is located at the end, and (c) the middle slab for the case where only one slab is located along the propagation direction

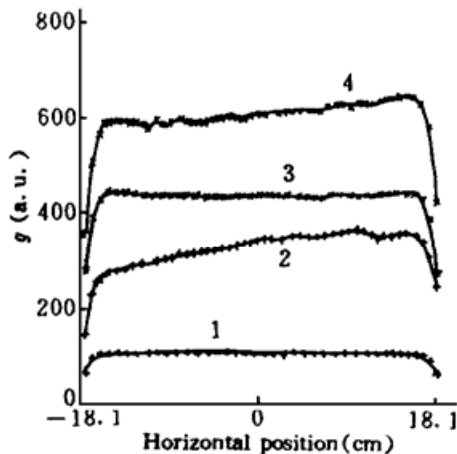


图 4 不同片长的 MSA 的非边缘片处的增益分布
1: 在光传输方向仅有 1 片长; 2: 在光传输方向有 2 片;
3: 在光传输方向有 3 片; 4: 在光传输方向有 4 片

Fig. 4 Calculated gain distribution of the middle slab for the cases

1: only one slab is located along the propagation direction; 2: two slabs are located along the propagation direction; 3: three slabs are located along the propagation direction; 4: four slabs are located along the propagation direction

将图 1 中 8 种情况的光线追迹结果组合可得到 MSA 的中间位置、边缘位置、端头和非端头位置片的泵浦光传输效率、储能效率和相对储能密度分布。非边缘非端头处的片、非边缘端头处和单片长的 MSA 的非边缘处的片的水平方向横截面上的储能密度分布分别如图 3(a), (b) 和(c) 所示。储能密度分布决定了增益分布情况。利用图 3 的结果, 可得到相应的在水平方向的增益分布。利用图 3(c) 的结果可得在激光传输方向上仅有 1 片钕玻璃的 MSA 的中间片的水平方向的增益分布, 利用图 3(b) 的结果可得在激光传输方向上有 2 片钕玻璃的 MSA 的中间片的水平方向的增益分布, 将图 3(a) 和(b) 的结果组合可得在光传输方向上有多片钕玻璃的 MSA 的中间片的水平方向的增益分布(见图 6), 同理可以得到在光传输方向上有多片钕玻璃的 MSA 的中间片水平方向的增益分布。从图 4 可见, 当在激光传输方向为奇数片时增益分布较均匀, 这与里弗莫尔实验室的结果^[1]是一致的。在程序中未计入 ASE 的影响,

故边缘处的增益没有出现文献[1]中所示的下翘现象。

3 结 论

3.1 MSA 的侧面闪光灯列阵作用类似于单片放大器, 中间灯列阵则不同, 它没有大曲率反射器或没有反射器, 或只有位于灯之间的小菱形反射器减少灯与灯之间的直接辐射, 使中间氙灯列阵的辐射与两边缘氙灯列阵的辐射平衡, 中间灯列阵的光传输效率通常比边缘灯列阵(如采用平板形反射器)的高。在这一新的几何构形下, 可以充分利用中间的灯列阵, 达到高的储能效

率,同时因灯的数量减少而降低总体造价。当外推到更大的列阵时,中间灯列阵的比例增加,总的泵浦传输效率接近于中间灯的泵浦传输效率。提高腔的传输效率的一大优点是在同一储能要求下可以降低灯密度;或在同一灯密度下达到高的储能。

3.2 在 MSA 中,中间灯列阵向位于它两侧的矩形片提供光能,而边缘灯列阵在一侧加入反射器仅向另一侧提供光能。所以,中间灯列阵的密度应比边缘灯列阵的高。

3.3 在实际的放大器中,由于一部分泵浦光从放大器的两端泄漏出去,所以使钕玻璃储能的横向分布存在不对称现象,从只有两片玻璃的放大器示意图可以看出,上面氙灯的一部分光从两端漏出,而下面氙灯的所有光都被导向片,靠近末端的玻璃片部分得到较少的泵浦光而增益低。若放大器的玻璃片数为偶数时,这种增益的不对称现象就肯定存在,而为奇数片时,则基本对称。当钕玻璃片数很多时,由于末端效应引起的增益不对称性对总增益的影响减小,故增益分布基本趋向均匀。

3.4 在 MSA 的设计中应合理选择片的厚度和几何尺寸。一般说来,薄片具有较高的储能密度以及高的增益,适合于短脉冲放大,厚片具有较高的储能和效率,适合于长脉冲放大。面积较大的片由于 ASE 的影响储能较低,但变化平缓。

在我们已建立的二维光线追迹程序基础上,可作进一步推广用于研究 ASE 影响等问题。

致谢 感谢上海光机所范滇元院士和丘悦博士与作者对有关问题所进行的有益讨论。

参 考 文 献

- 1 H. T. Powell, A. C. Relandson, K. S. Jancaitis *et al.*. Flashlamp pumping of Nd³⁺ glass disk amplifiers. *SPIE, High-Power Solid State Lasers and Applications*, 1990, **1277**: 103
- 2 J. B. Trenholme, J. L. Emmett. Xenon flashlamp model for performance prediction. in *Proceeding of Ninth International conference on high speed photography*, ed. W. G. Hyzen, W. G. Chase, New York: Society of motion picture and television engineers, 1970, 299~ 302
- 3 U. Bafile, P. Mazzinghi. Ray-tracing analysis of pumping reflectors for slab lasers. *SPIE, High Power Solid State Lasers*, 1988, **1021**: 120
- 4 J. H. Campbell, E. P. Wallerstein, J. S. Hayden *et al.*. Elimination of platinum inclusions on phosphate laser glass, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, UCRL-53932 (1990)
- 5 M. R. Siegrist. Cusp shape reflectors to pump disk or slab lasers. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(9): 2167~ 2171

Study on Geometrical Configurations of the Multisegment Amplifier

Feng Guoying Lü Baida

(*Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064*)

Zheng Wanguo

(*Institute of Laser Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Chengdu, 610064*)

Abstract Based on the experimental data of flashlamp radiation and Nd³⁺ glass absorption spectra, a numerical simulation model for the multisegment amplifier (MSA) has been proposed by using the ray-tracing and Monte Carlo methods. Numerical calculations have been performed to illustrate the dependence of transfer efficiency and the stored energy density distribution on the geometrical dimension and configurations of the MSA.

Key words multisegment amplifier(MSA), Nd³⁺ glass amplifier, ray-tracing