

多段阵列式钕玻璃放大器泵浦腔的 光线追迹分析*

冯国英 吕百达 郑万国**

(四川大学激光物理与化学研究所,

中国工程物理研究院四川大学现代光学与激光技术研究所, 成都 610064)

摘 要 采用光线追迹和蒙特卡罗法以及实验拟合数据, 建立了多段钕玻璃放大器闪光灯泵浦腔的数值计算模型。模拟结果表明, 光传输效率、储能密度分布和泵浦均匀性与泵浦腔几何构形有关。提出了一种新泵浦腔构形, 它具有效率高、均匀性好和造价不很高的优点。本文所得结果对大尺寸多段阵列式钕玻璃放大器设计有参考价值。

关键词 多段阵列式放大器, 泵浦腔, 光线追迹和蒙特卡罗法。

1 引 言

对新一代固体激光聚变驱动器的关键元器件——主放大器的泵浦腔结构作数值模拟和比较是重要的, 其关键问题是正确考虑多根闪光灯和多段激活介质几何排布以及泵浦腔的几何形状, 在此基础上建立合理的物理模型。在认真学习国际上多段阵列式放大器研究结果和现有工作基础上, 作者利用建立的闪光灯泵浦模型^[1], 用二维光线追迹法对多段阵列式放大器在含闪光灯轴线平面和与之垂直平面上分别完成了泵浦光分布的计算模拟程序。编制的软件可进行多种泵浦腔的光分布特性模拟和设计计算。

本项研究工作分为三部分: 闪光灯的泵浦特性, 从闪光灯到钕玻璃片的辐射转换以及片本身对泵浦光的吸收特性。其中的每一部分都是较为复杂的, 原因是: 1) 脉冲氙灯的发射谱和灯等离子体对不同波长的吸收系数均与灯内径单位面积的功率有关, 且其表面发光有随机性质, 必须引入蒙特卡罗法^[2], 因此对每一种泵浦腔构形, 需对十万条以上的光线进行追踪, 并且反射次数要足够多, 计算量很大。2) 在程序中要考虑到多种复杂的泵浦腔构形, 还要考虑到灯的排布和灯的数目对泵浦光分布和储能效率及腔壁不同位置处反射率的影响。3) 入射于钕玻璃表面的光线的位置和角度不同, 使它在玻璃内的行进路径不同, 且不同牌号的钕玻璃对不同波长光的吸收系数也是不同的。

* 国家科委 863 青年科学基金和国家科委 863 高科技项目的资助。

** 中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 成都 610003。

收稿日期: 1996 年 4 月 21 日

2 物理模型和计算模拟

2.1 氙灯辐射谱和吸收谱

在高气压和大电流密度作用下, 氙灯能发射出可见光波段的连续光谱辐射, 充气压强不同和工作电流强度不同的各种氙灯, 其辐射出的光谱组分均相同, 氙灯在点燃后, 其发光特性马上就接近稳定值。氙灯的发光特性主要取决于电流强度^[3]。Powell 等人建立了氙灯辐射模型^[4], 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 $300 \text{A/cm}^2 \leq J \leq 10^4 \text{A/cm}^2$, 氙灯内径 $0.2 \sim 2 \text{cm}$ 。在本文中, 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 $\phi = 1.5 \text{cm}$, 氙灯内压强 $p = 4 \times 10^4 \text{Pa}$, 输入功率 $P_{\text{in}} = 20.1 \text{kW/cm}^2$ 时进行计算后得到的, 考虑的是波长为 $0.4 \mu\text{m} \sim 1.0 \mu\text{m}$ 的光波。氙灯表面的辐射可看成是朗伯辐射光源, 在柱坐标系下, 光线发射方向与表面法线方向的夹角为 $\alpha (\alpha \leq \pi/2)$, 极角为 $\varphi (0 \leq \varphi \leq 2\pi)$, 由朗伯定律可得归一化的氙灯辐射能量角分布函数为

$$f(\alpha, \varphi) = \cos \alpha / \pi \quad (1)$$

为了进行二维光线追迹, 将灯表面发射的光线分别投影到灯轴线的垂直面和过灯轴线的水平面上, 则在投影面上的极角 α' 可表示为

$$\alpha' = \pm \cos^{-1} \left[\frac{\cos \alpha}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \varphi}} \right] \quad (2)$$

由于灯等离子体表面光线的发射有随机性质, 需要使用蒙特卡罗法, 对 α (在 $0 \sim \pi/2$ 范围内) 和 φ 在 $0 \sim 2\pi$ 范围内) 均匀取样, 则由(1)式和(2)式计算可得随机光线的相对光能量和相对于等离子体表面法线方向的极角 α' 。

2.2 磷酸盐钽玻璃光谱吸收特性

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。用洛仑兹函数拟合了 M93-N21-22 型磷酸盐钽玻璃的吸收谱, 当厚度为 6mm 时, 相对吸收曲线如图 1 所示, 与实验测得值^[5]符合很好。

2.3 光线追迹

多段阵列式放大器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, 可在垂直于灯轴线的水平方向截面上和过灯轴线的垂直方向截面上分别进行二维光线追迹。由于多段阵列式放大器在垂直方向上有很好的对称性, 光分布均匀, 在此不作详细讨论。本文中, 主要研究在水平方向横截面上泵浦腔形状、闪光灯排布数目及增益介质厚度等因素对泵浦光传输效率、泵浦均匀性和片水平方向横截面上相对储能密度分布的影响。水平方向横截面上二维光线追迹要点是: 采用蒙特卡罗法模拟光线从灯表面随机发射, 光线在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, 每一条光线都携带了相对光能量参数 E , 光线在泵浦腔内传输, 若被反射率为 R 的反射面反射, 则遵从反射定律继续传输, 相对光能量变为 RE , 若光线穿过灯等离子体, 在灯等离子体内的行进长度为 L_1 , 则相对光能量变为

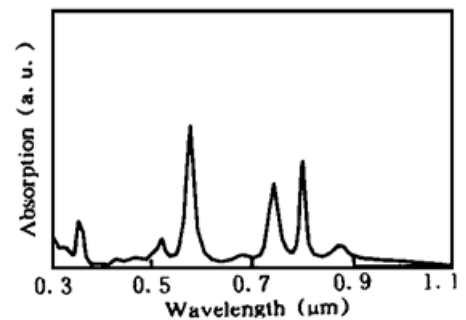


Fig. 1 Fitting absorption spectrum of the M93-N21-22 glass

$$E' = \left[E / \int_{0.4 \mu\text{m}}^{1.0 \mu\text{m}} \Psi(\lambda) d\lambda \right] \int_{0.4 \mu\text{m}}^{1.0 \mu\text{m}} \exp[-\gamma(\lambda)L_1] \Psi(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

式中, $\Phi(\lambda)$ 为氙灯的发射谱, $\gamma(\lambda)$ 为氙灯的吸收谱, 它们均与闪光灯内单位面积的电流强度、灯内径和管内充氙气的压强有关。当光线到达片表面时, 遵从菲涅耳定律。光进入片内部后, 片对光的吸收遵从比尔定律, 光能量为 E 的光线在片内行进 dL_2 时, 片吸收到的光能 ΔE 为

$$\Delta E = \left[E / \int_{0.4 \mu\text{m}}^{1.0 \mu\text{m}} \zeta(\lambda) d\lambda \right] \int_{0.4 \mu\text{m}}^{1.0 \mu\text{m}} \{1 - \exp[-\beta(\lambda)dL_2]\} \zeta(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

式中, $\beta(\lambda)$ 是根据实验数据拟合出来的磷酸盐钷玻璃的吸收谱, $\zeta(\lambda)$ 是泵浦光经传输后进入钷玻璃片的光谱。在光线追迹过程中, 当光线的反射次数大于 20 次(由于反射损耗, 能量已衰减到很小) 或当光线穿过片时, 即停止对它的追迹。统计片表面的泵浦光能量和片横截面上的储能密度分布就可进行不同形状泵浦腔的光传输效率、均匀性和储能的比较研究了。

3 计算模拟结果

作者对片状放大器的几种常见的聚光腔进行了光线追迹程序设计。图 2 中, 所考虑的聚光腔有平板形、圆柱形和双渐开线形。在 xoy 坐标系下, 渐开线的曲线方程为^[5]

$$\begin{aligned} x &= r_c(\sin \theta - \theta \cos \theta) \\ y &= -r_c(\cos \theta + \theta \sin \theta) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, 渐开线是以半径为 r_c 的圆展开的, θ 为极角。

双渐开线形聚光腔的光线追迹如图 3 所示。设腔壁的反射率 $R = 0.8$, 片距灯的最近距离为 50 mm, 其有效通光口径为 240 mm × 240 mm, 几种聚光腔(图 2 所示)的泵浦光传输效率比较如图 4 所示。

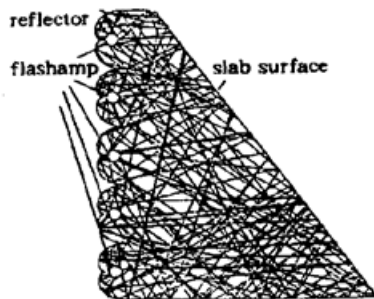


Fig. 3 Ray-tracing diagram of the involute pump-cavity

由图 4 可见, 当灯数均为 5 时, 平板形泵浦腔的光传输效率(71%) 最小; 圆柱形泵浦腔的光腔传输效率(78%) 比平板的高约 10%; 双渐开线形泵浦腔的光传输效率(85%) 最高, 且当改变灯数目时效率基本不变。通过光线追迹可以发现, 双渐开线形泵浦腔能将氙灯发出的所有方向上的光避开灯等离子体反射出去, 增加了光线对片的直射部分。图 5(a)、(b) 分别

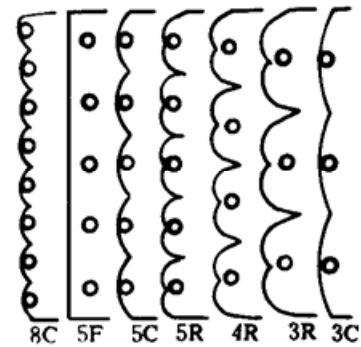


Fig. 2 Several pumping cavity configurations. (R: involute cavity, C: cylindrical cavity, F: flat cavity)

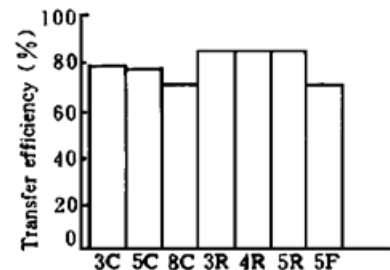


Fig. 4 A comparison of the transfer efficiency of some pumping cavities

为两种泵浦腔中被泵浦片表面上的光能量分布。

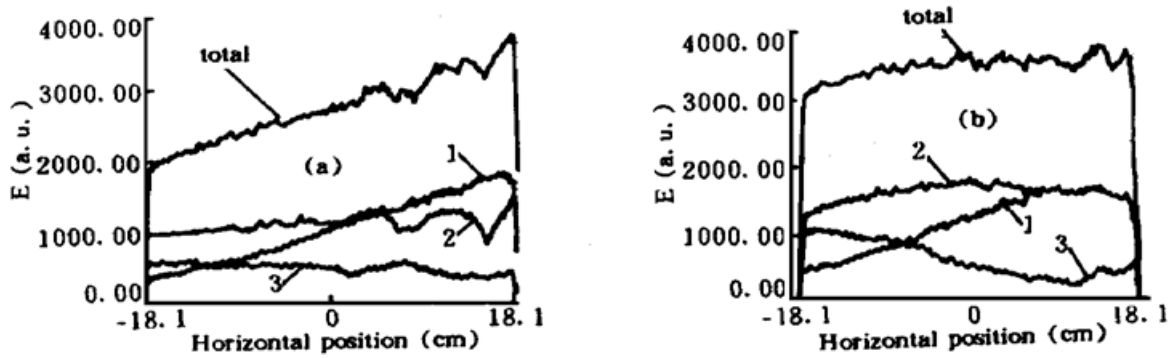


Fig. 5 Calculated relative energy distribution of the direct incidence (1—), after one reflection (2—), after two reflections (3—) and of the total incidence (total—) for (a) the flat and (b) involute

比较图 5(a) 和(b) 容易看出, 在水平方向上平板泵浦腔的总的泵浦光的分布为斜线, 不均匀的主要原因来自经过一次反射的光分布; 在含双渐开线形的泵浦腔中, 片表面上的泵浦光分布较均匀。圆柱形泵浦腔的光传输效率虽比平板的高, 但光分布均匀性差, 与文献[3]的结果是一致的, 本文中不再对它作详细讨论。

用作者设计的程序可进一步计算出与图 5 相对应的片对泵浦光的吸收情况, 即储能分布情况, 如图 6(a) 和(b) 所示。当闪光灯数目及发光特性相同时, 三种泵浦腔中片内储能的比值为: 1.00 · 1.07 · 1.42。灯发射光谱越强, 它对光谱的吸收也越强。比较图 6(a) 和图 6(b) 可以推断, 在平板形泵浦腔中, 灯的自吸收大, 经过灯等离子体的光的光谱成分与不经过的不同, 从而引起片对它们的吸收程度不同, 图 6(a) 的相对储能密度随片厚度变化比图 6(b) 的小, 说明图 6(b) 中到达片表面的光谱在钨玻璃吸收带内的成分更多。平板泵浦腔在工程上容易实现, 且当片两面是对称泵浦时, 可获得均匀性较好的增益分布, 但效率低, 且灯的自吸收严重, 影响了灯的寿命和泵浦脉宽; 双渐开线形泵浦腔则克服了平板形泵浦腔的缺点, 可获得较高的泵浦均匀性和光传输效率, 但工程上存在加工困难。由于平面的加工比球面的加工更容易, 为了兼顾平板泵浦腔和双渐开线形泵浦腔的优点, 作者提出了一种新型多平面形泵浦腔, 在水平方向上如图 7(a) 所示, 利用双渐开线的思想, 用 9 段长度相同、倾斜角不同的直线代替一条渐开线, 均可将来自氙灯表面的光避开灯等离子体反射出去。当为 5 灯泵浦时, 在片被泵浦表面上的泵浦光分布如图 7(b) 所示, 在片内部的相对储能密度分布如图 7(c) 所示。计算可得泵浦腔光传输效率为 85%, 片内部的储能与平板形泵浦腔对应值的比值

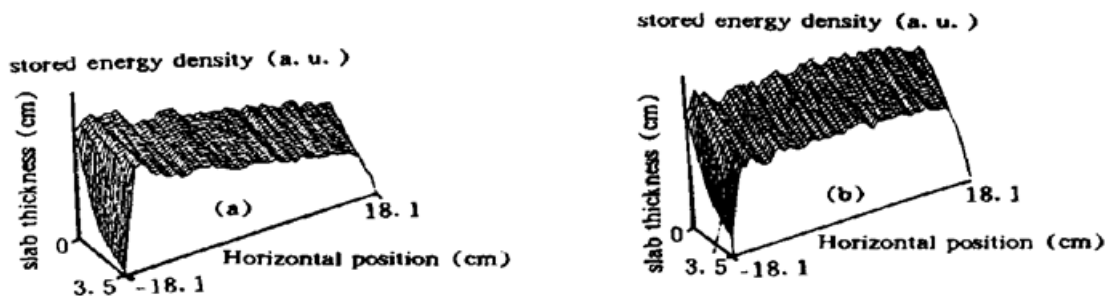


Fig. 6 Calculated stored energy density distribution at the horizontal section of (a) the flat and (b) involute cavities

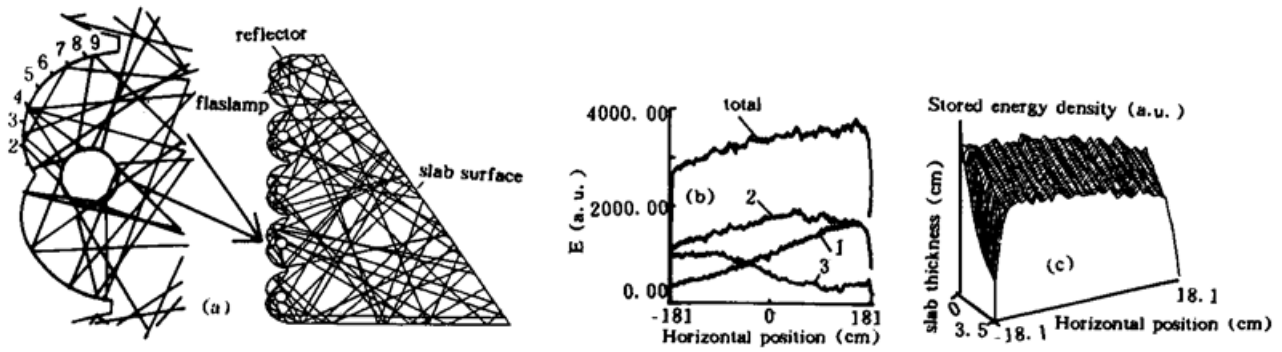


Fig. 7 (a) Ray-tracing diagram, (b) calculated pumping energy distribution and (c) calculated stored energy density distribution at the horizontal section of the multi-plane cavity

为 1.00~1.36。这种折线形泵浦腔可在兼顾加工和检测难度的基础上实现高的光传输效率、泵浦光分布均匀性。

小 结 本文所得主要结果可总结为:

1) 为建立对不同参数具有预测能力的闪光灯泵浦模型, 需对基本参数(如闪光灯发射谱、灯等离子体吸收谱随灯直径、灯内单位面积电流强度和灯内压强的变化, 不同牌号钕玻璃的吸收谱等)进行实验测量值的拟合, 还需较为全面地考虑多种因素(如灯表面的随机发射特性、泵浦腔形状、量子效率等)的影响, 这一问题是比较复杂的。在对已建立程序进行优化后, 已可在普通 486 微机上进行反射次数大于 20 次, 光线追踪数大于 50 万的光线追迹计算, 保证了引入蒙特卡罗法的计算精度。

2) 几何形状优化的泵浦腔可减小氙灯的自吸收和再发射, 有利于延长氙灯的寿命; 另外, 可使光集中在较小的角度分布以达到高转换率, 因为反射镜的结构决定了光能量在片被泵浦面上的角度分布, 这种角分布影响光到达片的平均反射次数和在片表面的菲涅耳反射量。

3) 与一般激光器用泵浦腔设计不同的是, 对多段阵列式放大器需考虑多根闪光灯和多段介质的几何排布对泵浦均匀性影响, 使设计变得复杂。作者的计算模拟给出了两个多段阵列式放大器的设计折衷: 第一, 增加闪光灯的密度可给出片上高的储能, 但减少了储能效率; 第二, 采用形状较复杂的泵浦腔提高泵浦光传输效率, 但提高了成本。作者的模型提供了对这些参数的预测能力, 并可推广用于对漫反射腔和计入放大自发辐射影响等的研究, 所得结果对高性能价格比的大尺寸的钕玻璃聚变驱动器的优化设计是有用的。

感谢中国科学院上海光学精密机械研究所范滇元院士和丘悦博士与作者所进行的有益讨论。

参 考 文 献

- [1] 冯国英, 吕百达, 叶一东等, 多根板条固体激光器用聚光腔的研究. 激光技术, 1996, 20(5): 285~290
- [2] U. Bafilo, P. Mazzinghi, Ray-tracing analysis of pumping reflectors for slab lasers. *Proc. SPIE*, 1988, 1021: 120~126

- [3] 吴继宗, 叶关荣, 光辐射测量. 机械工业出版社, 北京, 1989: 101~ 103
- [4] H. T. Powell, A. C. Relandson, K. S. Jancaitis *et al.*, Flashlamp pumping of Nd: glass disk amplifiers. *Proc. SPIE*, 1990, **1277**: 103~ 120
- [5] 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
- [6] M. R. Siegrist, Cusp shape reflectors to pump disk or slab lasers. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(9): 2167~ 2171

Ray-Tracing Analysis of Pumping Reflectors for the Multisegment Nd-Glass Amplifier

Feng Guoying Lü Baida Zheng Wanguo

(*Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University,*

Institute of Modern Optics and Laser Technology,

China Academy of Engineering Physics Sichuan University, Chengdu 610064)

(Received 21 April 1996)

Abstract Using the ray-tracing and Monte Carlo as well as the experimental fitting data, we present a numerical simulation model for pumping cavities of the multisegment Nd-glass amplifier. The simulation shows that the transfer efficiency, stored energy density distribution and uniformity of the pump radiation are dependent on the pumping cavity geometry. A novel pumping cavity is proposed, which demonstrates advantages of the high efficiency, good uniformity and tolerable cost. The results obtained are useful for the design of the large-scale multisegment Nd: glass amplifier.

Key words multisegment amplifier(MSA), pumping cavity, ray-tracing and Monte Carlo methods.