

多灯泵浦椭圆腔棒状放大器的效率设计

徐世祥 林尊琪

(中国科学院上海精密机械研究所高功率激光联合实验室, 上海 201800)

摘 要 通过细致的数值计算和理论分析, 系统在阐述了在放大介质和泵浦灯口径一定的情况下, 光腔膜层反射率、泵浦灯数、椭圆结构参数、水管结构参数等对泵浦效率的影响, 并着重分析了当激活介质离开椭圆焦点靠近泵浦灯时放大器泵浦效率的变化。这些结果对多灯泵浦椭圆腔棒状放大器设计有重要参考价值。

关键词 棒状放大器, 泵浦效率, 离焦量。

1 引 言

在高功率激光系统中, 棒状放大器的设计是一个重要的技术环节。从传统的观点看, 对于椭圆腔体来说, 灯和棒都置于椭圆的焦点是对泵浦效率是理想的, 所以在以往的设计中仅通过椭圆柱的长短轴变化与泵浦效率的关系来选择椭圆参数。其实以上这种考虑是不全面的。在此, 本文提出基于放大器的泵浦效率不但与椭圆的几何参数有关, 同时还涉及到腔面膜层反射率、泵浦灯数目、冷却水管结构等参数; 对泵浦效率的贡献除了灯直接投射到激活介质或经腔体的一次反射投向激活介质的光线外, 还有多次反射光线的贡献。所以在放大器设计时必须考虑到上述各因素的影响。

2 计算原理

运用几何光学原理, 建立了一个二维的光泵效率计算模型。在此模型中, 作了如下假设: 1) 泵浦灯横截面为均匀发光体。2) 计算结果只是包含了直接入射或经光腔一次反射后入射激活介质的光线对泵浦效率的贡献。由于经多次反射后进入激活介质的光线对泵浦效率贡献的计算比较复杂且可看作具有一定的随机性, 所以在灯、棒参数一定的条件下, 可以认为腔体的线度越大, 多次反射对泵浦效率的贡献越小。3) 当光线从泵浦灯发出后再遇上泵浦灯, 认为被灯完全吸收。4) 泵浦光为完全非偏振光。5) 发光点发出的每根光线的能量为 1, 每个点以 2π 平面角发射光线。基于上述假设, 每个发光点的泵浦效率为^[1]:

$$\eta = \frac{1}{2\pi} \left[\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} TR_c d\alpha + \int_{\beta_1}^{\beta_2} T d\beta \right] \quad (1)$$

式中 $\alpha_1 \sim \alpha_2$ 为光线经腔体一次反射后射入激活介质的角范围, $\beta_1 \sim \beta_2$ 则为光线直接射入激活介质的角区。 R_c 为腔体反射率, T 为光线经水管进入棒的总菲涅耳能量透过率。所以截面上各点效率的几何平均数为:

$$\bar{\eta} = \frac{\int \eta_{ds}}{\pi R_L^2} \quad (2)$$

式中 R_L 为泵浦灯的半径。如果知道泵浦灯的种类、规格及其发射光谱线, 选择好工作物质, 则理论上效率计算应复盖泵浦灯发射光谱线的全范围, 同时考虑到工作物质对不同波长光的不同吸收, 则效率表达式应为:

$$\eta_0 = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \xi \eta \chi_E \chi_{abs} d\lambda \quad (3)$$

式中 ξ 为与波长有关的权函数, χ_{abs} 、 χ_E 分别为归一化的吸收系数和发射光谱能量, 而 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 为泵浦灯发射光谱线的范围。

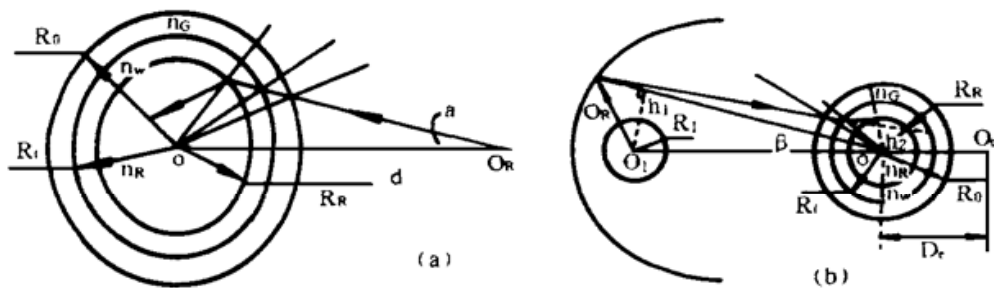


Fig. 1 The sketch of the light from one spot in a lamp falling directly (a) or after being reflected by inside of a elliptic cavity once (b) to the rod

某发光点发出光线能直接入射到激活介质如图 1(a) 所示, 必须满足下列条件:

$$d \sin \alpha \leq \min (R_o, n_G R_i, n_w R_R) \quad (4)$$

式中 R_R 、 R_i 、 R_o 分别为激活介质半径和水套内、外径, d 为发光点到棒中心距离, n_G 、 n_w 分别为水套玻璃和水的折射率。显然, 由于 $n_G R_i > n_w R_R$, 所以(4)式可写成:

$$d \sin \alpha \leq (R_o, n_w R_R) \quad (5)$$

某发光点发出光线经光腔一次反射后能到达激活介质必须满足如图 1(b) 所示。

$$h_1 > R_L, \quad \beta \leq \pi / N, \quad h_2 \leq \min (R_o, n_w R_R) \quad (6)$$

式中 N 为泵浦灯数。(6) 式保证光线经腔片反射后不被灯自身挡住。本文定义当发光点位于灯的横截面中心, 且光线经腔一次反射后满足 $h_1 \leq R_L$ 时所对应的角区域称为一次反射光线死角 α_b , 显然 α_b 取决于腔的几何参数和 R_L 值。 α_b 的大小除对一次反射泵浦效率有影响外, 过大的 α_b 会引起过多的光被在灯与腔壁间来回反射, 使腔片发黑(这在以往实验中已观察到), 从而影响腔片寿命。(6) 式中的第二关系式的意义是光线在经一次反射以前不要越出腔片边缘。(5) 式、(6) 式中的第三关系式的意义有两点: 1) 光线经一次反射后与棒中心距离必须小于水套外径; 2) 光线入射水套后不致发生菲涅耳全反射而无法到达激活介质。

3 计算结果和讨论

利用上述计算模型, 若设泵浦氙灯规格为 $\varnothing 20$ mm, 激活介质 $\varnothing 50$ mm 的掺钕硅酸盐玻

璃, 水套外径为 $\varnothing 26.5$ mm, 厚度为 2 mm, 其材料为掺铈石英管(具有吸收中紫外功能)。在实际设计中, 完全按(3)式计算其计算量是相当大的。本文只是为了说明有关因素对效率的影响, 为简便起见选用了硅酸盐玻璃的一强吸收波长 350 nm 进行计算, 并定义光线经腔体一次反射后射入激活介质对泵浦效率的贡献为一次反射泵浦效率 η_1 ; 光线直接射入激活介质对泵浦效率的贡献为直接入射泵浦效率 η_2 。

3.1 灯、棒置于椭圆两焦点处时, 腔壁反射率和长短轴比对椭圆长轴与泵浦效率关系的影响

对于长、短轴比一定的椭圆。从理论上可知: 长轴 2A 越大, 则 α_b 越小, 这有利于提高 η_1 的值, 但此时泵浦灯和棒的距离也越大, η_2 值就会降低。长短轴比 B/A 值越大则 α_b 越小, 这有利于提高 η_1 的值, 但此时腔横截面有效弧长越短, 这会降低 η_1 的值; 另一方面, 当 A 一定时, 由于灯和棒距离较小, η_2 值较大。而 R_c 只与 η_1 有关。图 2(a) 则是当 B/A 为 0.75, R_c 为 85%、90% 两种情况下, A 与泵浦效率的关系曲线。图 2(b) 是在六灯泵浦条件下, R_c 为 85%, B/A 为 0.8、0.75 两种情况下, A 与泵浦效率曲线。

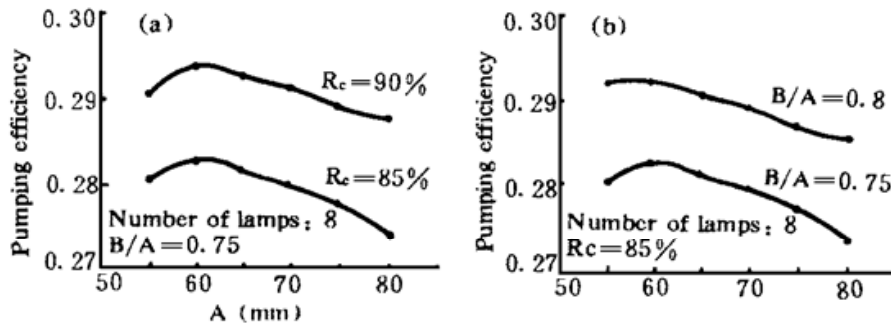


Fig. 2 The curves of pumping efficiency vs. half of major axis of elliptic cavities

3.2 在长轴一定的条件下, 选择不同的长短轴比、不同的腔壁反射率, 观察当棒离开焦点向灯靠近时, 泵浦效率的变化

本文计算灯仍置于焦点处, 而将棒离开另一焦点移近灯。图 3(a) 为当 B/A = 0.8, R_c 分别为 95%、85%、75% 三种情况下, 泵浦效率和棒离焦量的关系曲线。 R_c 为 95% 的曲线处于最上方, 其次分别为 $R_c = 85%$ 和 75%, 这是容易理解的。这三条曲线的形状相近, 随着离焦量增加。起始泵浦效率呈单调递减, 到一最小值后, 又呈单调递增趋势。所不同的是, R_c 越大, 所对应曲线起始时下降速度越快, 降至最低值后上升速度越慢, 而且最低泵浦效率所对应的离焦量越大。这是由于 1) 离焦量越大, 直接入射激活介质的光线越多, 经一次反射入射激活介质的光线越少。2) R_c 只与 η_1 有关而与 η_2 无关。

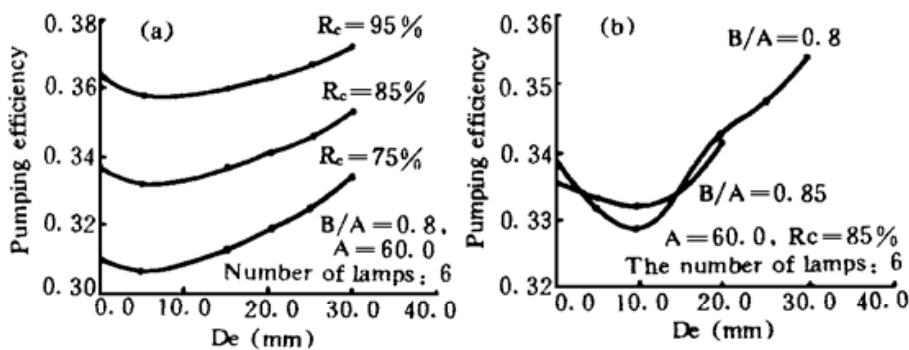


Fig. 3 The curve of pumping efficiency vs. the distance of the rod away from central focus to the lamps

图 3(b) 是 $R_c = 85\%$ 时, 不同 B/A 值情况下棒离焦量和泵浦效率的关系曲线。由图可知: 当 $B/A = 0.85$ 时, 随着离焦量增加, 起始泵浦效率变化缓慢(略呈下降趋势), 直至离焦量至 10 mm 附近时, 曲线才呈上升趋势。当 $B/A = 0.8$ 时, 曲线开始下降速度比 $B/A = 0.85$ 时快, 当离焦量约 10 mm 左右时, 曲线开始明显上升。可见, B/A 值不同, 将对泵浦效率与离焦量的曲线走向影响很大。

3.3 椭圆参数一定时, 冷却水管内、外径变化对泵浦效率的影响

由(5)式、(6)式知: 当 $n_w R_R > R_0$ 时, 适当增加 R_0 有助于提高泵浦效率, 当 $R_0 > n_w R_R$ 时, R_0 的大小对泵浦效率的影响和 R_i 一样甚小。图 4(a) 是 R_0 不变, R_i 分别为 23 mm、25 mm 两种情形下泵浦效率与离焦量的关系曲线, 图 4(b) 则是 $R_0 = 27$ mm、26 mm 时曲线图; 图 4(c) 是对应 $R_0 = 26$ mm、27 mm 而 R_i 始终为 24 mm 时的情况。图 4 反映的情况与理论分析相符。设计时取 $R_0 = n_w R_R$ 是适宜的。

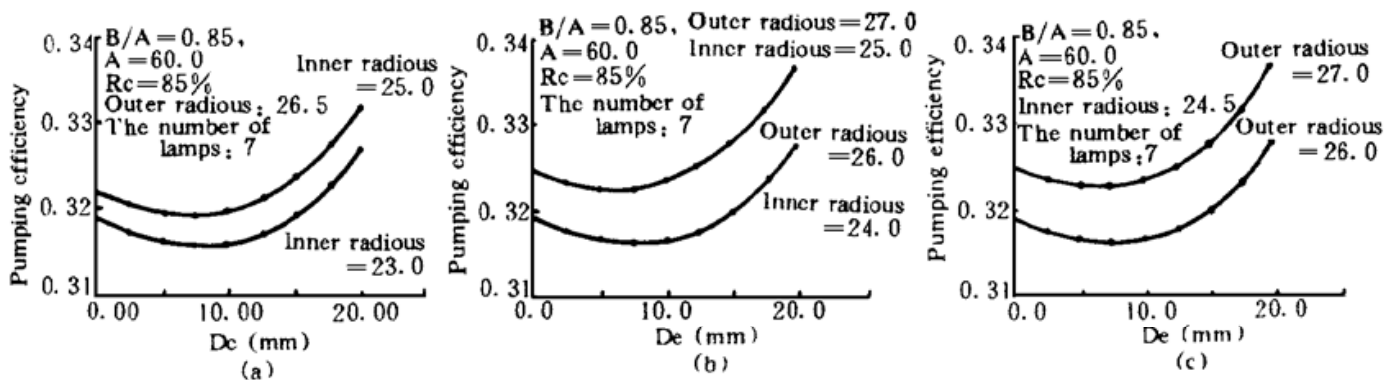


Fig. 4 The curves of pumping efficiency vs. the distance of the rod away from the central focus to the lamps with different outer and inner radii of the glass tube

3.4 泵浦灯数变化对泵浦效率的影响

泵浦灯数的变化对泵浦效率的影响是明显的。灯数的增加必然引起每个灯泵浦效率的降低, 也使腔体结构变复杂, 放大器成本增加; 但同时也引起总注入能量的增加。因此选择合适的灯数是非常重要的。既要兼顾泵浦效率和注入能量。也要同时兼顾腔体结构和放大器成本。为此本文定义了一个数学量: $S_\eta = N\eta_0$, 通过计算它来选择灯数。图 5 是 $B/A = 0.8$ 、 $R_c = 85\%$ 时 S_η 与 N 的关系曲线, D_e 表示棒的离焦量。由图可知: 三条不同 D_e 值曲线形状基本一样。随着 N 值增加, 曲线斜率逐渐变小, 变化速度也逐渐减慢。这从 $S_\eta = N(\eta_1 + \eta_2)$ 可很好解释; N 越小, η_1 越大, $\eta_1 + \eta_2$ 越大, 曲线斜率越大。理论上当 $N \rightarrow \infty$ 时, $\eta_1 \rightarrow 0$, 曲线渐近线斜率为 η_2 。 D_e 越大, η_2 越大。从图 5 知: 在给定条件下, 选择 $N = 8$ 左右是适宜的。此时 $A \approx 60$, $B/A \approx 0.8$, 从效率的角度出发, 兼顾灯和棒的间距, D_e 应尽可能大。

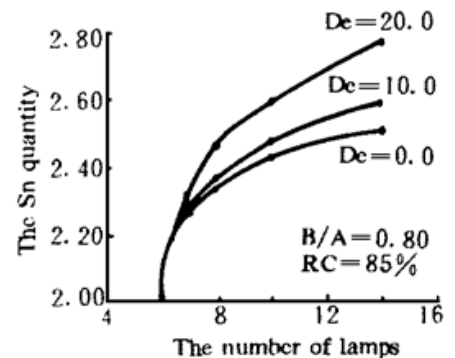


Fig. 5 The curves of pumping efficiency vs. the number of the lamps

结论 从以上讨论知, 在多灯泵浦椭圆腔棒状放大器效率设计时, 应根据现有腔体镀膜的反射率水平、泵浦灯和工作物质的种类、参数确定 A 、 B/A 、 D_e 值, 同时兼顾腔体的总线度, 以期达到最佳设计。对于水套外径, 一般应为 $n_w R_R$ 。

Design for Pumping Efficiency of Rod Amplifier of Ellipic Cavities with Multiple Lamps

Xu Shixiang Lin Zunqi

(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*)

(Received 18 July 1995; revised 25 September 1995)

Abstract The influences of some factors of rod amplifier on its pumping efficiency are studied by numerical methods with certain radii of the rod and the lamps. These factors include the reflectivity of the inside of its elliptic cavities, the cavities' major and minor axes, the distance of the rod away from the central focus to the lamps, the number of the lamps and the structure of the glass tube for cooling the rod. The results are very useful for the design of rod amplifier.

Key words rod amplifier, pumping efficiency.