

## 漫反射聚光腔的聚光效率

王少川

提高聚光腔的聚光效率是提高整个激光器的效率的一个重要环节之一。聚光腔按反射的性质可分为镜面反射腔和漫反射腔两种。按结构形状可分为椭圆腔（又分单椭圆腔和多椭圆腔）、圆柱腔、相交圆柱腔等多种腔型。在实际中因工艺和实验条件的不同，常见到互相矛盾的关于各种腔型的聚光效率的报道。究竟哪一种腔的聚光效率高，这是一个有实际意义的问题。从理论上提出各种腔的聚光效率的数学模型，用计算机计算出其效率是十分必要的。

本文提出一种计算漫反射腔的聚光效率的公式，并且用计算机计算出具体结果，还进行了初步实验。

聚光腔的聚光效率一般定义为实际照射到激光棒上的能量与灯辐射的能量之比。它和腔、灯、棒的几何形状及其相互位置等几何参数有关，也和腔壁的反射率有关。现有文献上<sup>[1]</sup>的公式是粗略近似的公式，并且计算的是激光棒实际吸收的能量与所有各面吸收的能量之比。照到棒上的能量和棒实际吸收的能量是不同的。对于脉冲激光器，灯、棒和腔壁并不处于热平衡状态。故用该公式算得的聚光效率不便和其它按一般定义算得的聚光效率相比较。

设灯辐射的辐照度在漫反射圆柱面上是均匀的。设灯的辐射通量为 $F$ ，圆柱腔的表面积为 $S_2$ ，则圆柱面上的辐照度为 $H = F/S_2$ 。设灯的半径为 $r_1$ ，圆柱腔的半径为 $r_2$ ，激光棒的半径为 $r_3$ 。在腔面上任取一面元 $dA_2$ ，设腔壁的漫反射系数为 $\rho$ ， $dA_2$ 反射的通量为 $dF_2$ ，考虑到光线在漫反射腔中的多次来回反射，由于灯和棒的吸收，每次反射都损失 $(r_1^2 + r_3^2)/r_2^2$ 部分的能量，令 $k = 1 - (r_1^2 + r_3^2)/r_2^2$ ，其反射的通量密度在腔壁各处最终都为 $\rho/(1 - k\rho) \cdot F/S_2$ 。在 $S_2$ 上面元 $dA_2$ 反射的辐射通量为 $dF_2 = \rho/(1 - k\rho) \cdot F/S_2 \cdot dA_2$ 。从面元 $dA_2$ 反射的辐射通量中每单位立体角在 $\varphi_2$ 方向辐射的部分为 $\cos\varphi_2/\pi$ <sup>[2]</sup>。 $\cos\varphi_2/\pi$ 也可理想为漫反射的方向因子。以 $dA_2$ 为球心以 $R$ 为半径作一球面 $S_3'$ ， $dA_3'$ 是 $S_3'$ 上一面元。单位面积对应的立体角为 $Sr/R^2$ 。在 $dA_3'$ 处每单位面积接收的从 $S_2$ 反射的通量为 $dH_3'$ <sup>[2]</sup>，

$$dH_3' = \iint_{S_2} \frac{\cos\varphi_2}{\pi R^2} dF_2$$

现在实际的接收面 $S_3$ 是圆柱形的激光棒， $dA_3$ 是其上一面元。从 $dA_2$ 到 $dA_3'$ 的方向与 $dA_3$ 的法线方向的夹角为 $\varphi_3$ ，则

收稿日期：1985年7月23日。

$$dA_3' = dA_3 \cdot \cos\varphi_3$$

圆柱面 $S_3$ 上接收的通量为:

$$F_3 = \iint_{S_3} \cos\varphi_3 dA_3 \iint_{S_2} \frac{\rho F}{(1 - k\rho) S_2} \cdot \frac{\cos\varphi_2}{\pi R^2} dA_2$$

聚光效率 $\eta$ 为照射到棒上的辐射通量与灯辐射的通量之比, 即:

$$\eta = \frac{F_3}{F} = \iint_{S_3} dA_3 \iint_{S_2} \frac{\rho \cos\varphi_2 \cos\varphi_3}{\pi R^2 S_2 (1 - k\rho)} dA_2$$

下面具体求 $\cos\varphi_2$ ,  $\cos\varphi_3$ ,  $R$ 。

如图 1 选择坐标系。P( $x_2, y_2, z_2$ ) 是腔壁 $S_2$ 上任一点, 腔壁是半径为 $r_2$  长为 $L$ 的圆柱, P必满足方程:

$$\begin{cases} x_2^2 + y_2^2 = r_2^2 \\ 0 \leq z_2 \leq L \end{cases}$$

$$y_2 = \sqrt{r_2^2 - x_2^2}$$

$$dA_2 = \frac{r_2}{y_2} dx_2 dz_2$$

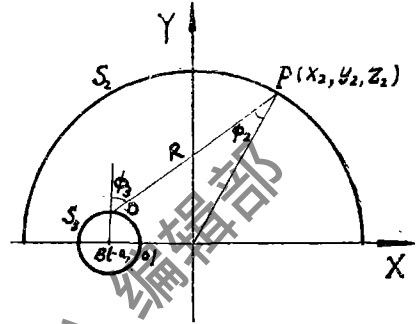


图 1

激光棒是半径为 $r_3$ 的圆柱, D( $x_3, y_3, z_3$ )是其上一点, D必满足方程:

$$\begin{cases} (x_3 + a)^2 + y_3^2 = r_3^2 \\ 0 \leq z_3 \leq L \end{cases}$$

$$y_3 = \sqrt{r_3^2 - (x_3 + a)^2}$$

$$dA_3 = \frac{r_3}{y_3} dx_3 dz_3$$

$y_3' = -\sqrt{r_3^2 - (x_3 + a)^2}$  表示棒的下半部分。

$$\therefore \vec{PO} = (-x_2, -y_2, -z_2), \vec{PD} = (x_3 - x_2, y_3 - y_2, z_3 - z_2)$$

$$\therefore \cos\varphi_2 = \frac{(x_2 - x_3)x_2 + (y_2 - y_3)y_2 + (z_2 - z_3)z_2}{\sqrt{[(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2 + (z_2 - z_3)^2]} \sqrt{(x_2^2 + y_2^2 + z_2^2)}}$$

激光棒过D点的切平面上过D点的法线矢量为 $(x_3 + a, y_3, 0)$ ,  $\vec{DP} = (x_2 - x_3, y_2 - y_3, z_2 - z_3)$

$$\cos\varphi_3 = \frac{(x_2 - x_3)(x_3 + a) + (y_2 - y_3)y_3}{r_3 \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2 + (z_2 - z_3)^2}}$$

$$R = \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2 + (z_2 - z_3)^2}$$

$$\eta = \frac{2\rho}{1 - k\rho} \int_{-r_3 - a}^{r_3 - a} dx_3 \int_0^L dz_3 \int_{-r_2}^{r_2} dx_2 \int_0^L \frac{r_2 [(x_2 - x_3)x_2 + (y_2 - y_3)y_2 + (z_2 - z_3)z_2]}{\pi y_2 y_3 S_2 [(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2]}$$

$$\frac{[(x_2 - x_3)(x_3 + a) + (y_2 - y_3)y_3]}{+(z_2 - z_3)^2} \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2} dz_2 + \frac{2\rho}{1 - k\rho} \int_{-r_3 - a}^{r_3 - a} dx_3 \int_0^L dz_3 \int_{-r_2}^{r_2} dx_2 \int_0^L dy_2$$

$$\frac{r_2[(x_2 - x_3)x_2 + (y_2 - y_3)y_2 + (z_2 - z_3)z_2][(x_2 - x_3)(x_3 + a) + (y_2 - y_3)y_3]}{\pi y_2 y_3' S_2 [(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2 + (z_2 - z_3)^2] \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}} dz_2$$

这就是计算漫反射腔聚光效率的公式。第一项表示棒的上半周接收从腔的上半周反射的部分，第二项是表示棒的下半周接收从腔的上半周反射的部分。

根据计算机计算的结果如下表：

$\eta$ $r_2, a$ (mm)		$\rho$					
		0.9	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95
$r_2 = 14$	$a = 2$	0.521	0.598	0.647	0.711	0.768	0.845
	$a = 8$	0.534	0.575	0.622	0.683	0.739	0.812
$r_2 = 19$	$a = 4$	0.564	0.616	0.677	0.750	0.837	0.945
	$a = 12$	0.535	0.584	0.642	0.711	0.794	0.896

漫反射聚光腔是在玻璃圆柱的外面再做一个半径大5mm的金属圆柱，在两者之间紧密地填充BaSO<sub>4</sub>粉末。镜面反射腔是用相同大小的玻璃圆柱，在外表面镀银制成。实验记录如下表：

腔  $\phi 14 \times 72 \text{mm}^2$ ，电容60 $\mu\text{F}$ ，电压1000V，18.2mJ/格

类别	输出距离	14mm		12mm		10mm	
		不通水	通水	不通水	通水	不通水	通水
漫反射圆柱腔		18格	17格	19格	18格	22格* (19格)	(18格)
镜面反射圆柱腔		19.5格	17格	18格	15格	21格	18格

\*用漫反射圆柱腔在距离为10mm时不通水的输出是22格。因探头和激光器移动，再调整后不通水时输出19格，通水后输出18格。

从上述计算结果和实验数据的分析可知：

1. 在我们做的这次实验中，漫反射圆柱腔比镜面反射圆柱腔的效率还略高一些，至少是不低于镜面反射腔。从计算结果来看只要漫反射系数足够高，这是可能的。
2. 在通水和不通水两种情况，漫反射腔在通水后输出只下降一个格，而镜面反射腔在通水后输出下降三个格。通水后漫反射腔的实际工作状态的输出要高一些。这可能是因为漫反射腔中各处的光辐射较均匀，通水后因折射、气泡、湍流的影响不大。而镜面反射腔通水后对镜面反射的光辐射的传播影响较大。
3. 在漫反射腔中，漫反射系数对效率的影响最大。漫反射系数 $\rho$ 越大效率越高。
4. 灯和棒放的位置越靠近中心，圆柱腔的效率越高。（下转第33页）

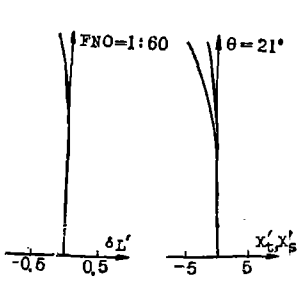


图 7

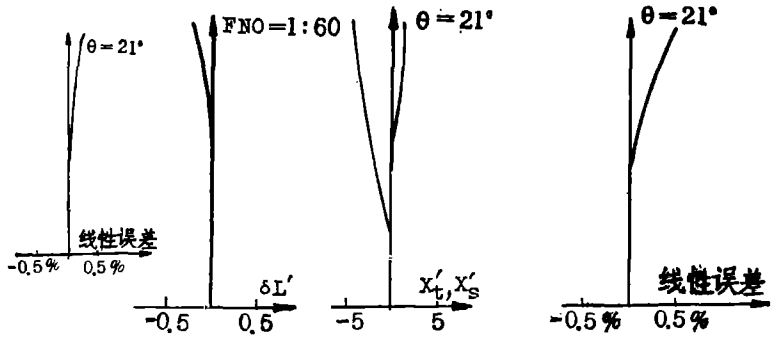


图 8

(四) LaK<sub>1</sub>-LaK<sub>1</sub>

R	D	$n_{s_{000}} \dot{\Delta}$	
-147.646	37.97		
-101.243	33.75	1.46913	LaK <sub>1</sub>
-379.662	42.18		
-134.991	21.1	1.46913	LaK <sub>1</sub>

初级象差系数

$\Sigma S_1 = 1.7247E - 0.5$ ,  $\Sigma S_2 = -4.514E - 0.5$ ,  $\Sigma S_3 = -6.680E - 0.4$ ,  $\Sigma S_4 = 1.7812E - 0.3$ ,  $\Sigma S_5 = 0.072242635$ .

象差曲线 (图 8)

由上述四组 F-θ 透镜的初级象差系数  $\Sigma S_5$  分别为 0.07426065、0.0748747、0.0851598、0.072242635, 显然与  $\Sigma S_5 = f' \cdot FNO \cdot \theta^3 / 3 = 0.0785572$  是非常接近的。

参 考 文 献

- [1] 陈海清, 《激光杂志》, 1984年, 第4期, 第217~222页。
- [2] 陈海清, 《兵器激光》, 1984年, 第5期, 第33~36页。
- [3] U.S.P., 4,253,735。

(上接第44页)

5. 棒的直径越大效率越高。

漫反射腔还有一个突出的优点是制作简单, 成本低廉, 对腔壁的要求不高, 对灯和棒的位置不敏感, 通水后实际工作状态的输出相对较高。用玻璃管套作衬里的漫反射腔还有不易受污染的优点。

北京工业学院激光教研室主任魏光辉、基础光学教研室主任赵达尊审阅了本文, 在此一并致敬。

参 考 文 献

- [1] Robert T. Pitlak, A Program for Laser Pumping Cavities, ELECTRO-OPTICAL SYSTEMS DESIGN, June, 1982, P.45~48.
- [2] 王少川, 《兵工学报》, 1983年, 第4期, 第9~20页。