

激光振荡器中采用软边光阑技术*

林尊琪 郑玉霞 余文炎

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

一、引 言

为了减少由于菲涅耳衍射造成工作物质的非线性自聚焦和破坏,软边光阑技术已广泛应用于大功率激光放大系统中^[1,2]但未见在振荡器中采用这一技术。在振荡器中使用软边反射腔板或其它种型式的软边光阑做为有效光阑,可造成腔内相对于 TEM_{00} 模有利的反射损耗,并可在平均损耗不大于 40% 的情况下,有效地改善振荡器输出的方向性指标。我们用介质膜软边反射腔板进行了这方面的实验,明显地改善了振荡器输出的方向性。又采用数值计算法对腔内不同模式的反射损耗做了计算,并与实验结果进行比较,结果大致相符。

计算是以 Вайнштейн^[3] 导出的圆型平面谐振腔本征核为基础做数值积分,并考虑了改变超高斯型软边光阑级参数对各种振荡模式的反射损耗的影响。结果表明,当超高斯型软边级参数 $N_s = 4.5$,而软边光阑有效半径 R_s 为有效硬边光阑半径的 0.7 倍,则为 TEM_{00} 模最佳起振条件。

关于光阑制作方面,由于小口径介质膜反射式软边光阑制作工艺上的困难,我们考虑了另外几种软边光阑技术。

二、基本设想及实验

迄今为止,振荡器选模技术,主要建立在不同横模衍射损耗^[4,5]或几何损耗^[6]有差异的基础上。但在一般固体激光腔中,与输出腔板的透射损耗相比,模的衍射损耗只占一个很小的百分比。通常为了突出衍射损耗,并利用不同模的衍射损耗之差别来选取低阶模,需要在腔内加小孔以减小菲涅耳数。但这样必然造成振荡模的模体积变小、有些作者^[7,8]从理论上分析了高斯型反射率的高损耗腔的振荡模式,但未见实际应用。软边反射腔板做后腔板,在腔内建立了振荡光束截面有特定分布的损耗,我们称之为反射损耗。这是由软边反射腔板径向各处的反射率不同造成的。这样我们可以利用软边光阑或软边反射腔板,使振荡光束的能量损耗中心部分小,边缘大,等效于中间高周围低的激活介质棒端面增益分布,从而加强 TEM_{00} 模相对于其它横模的竞争能力,达到改善激光振荡器亮度的结果。用 $\phi 20 \times 520$ 钹玻璃棒,圆型平板谐振腔及平凸非稳定腔,分别做的比较实验证实了这种设想。

* 1978 年 4 月 17 日收到。

超高斯型软边反射腔板反射率表达式为 $e^{-\left(\frac{r}{R_a}\right)^{N_B}}$, 式中 N_B 为级参数; R_a 为软边光

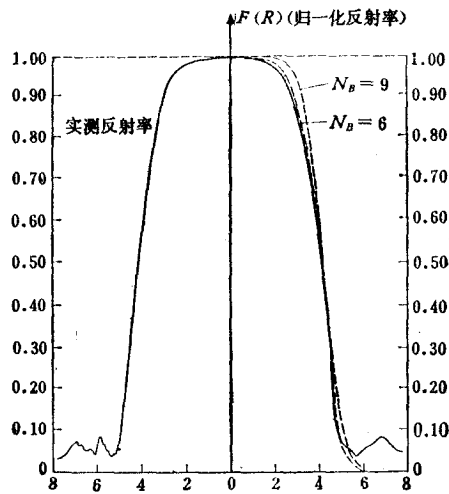


图1 软边反射腔板反射率曲线

阑有效半径, r 为极坐标半径。硫化锌、氟化镁涂制的介质模软边反射腔板对 $1.06 \mu\text{m}$ 波长光的反射率曲线示于图1。为了比较,图1中用虚线标出超高斯软边级参数 $N_B = 6$ 及 $N_B = 9$ 的软边反射率曲线。软边曲线有效直径(反射率下降到最大值的 $1/e$ 处)为 9mm 。这是由设计值确定的。

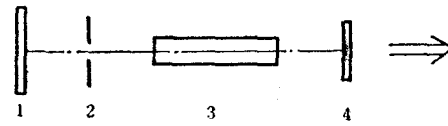


图2 软边腔振荡器结构

1——软边反射腔板 $R_a = 4.5\text{mm}$; 2——硬光阑 $a = 4.5\text{mm}$; 3——钨玻璃棒; 4——输出腔板 $T = 50\%$ 。

图2给出软边反射腔板作为后腔板的振荡器装置。为简单起见,腔内未加电光调Q单元。激光输出取样后用尖劈法判断激光束方向性指标。不同实验条件下尖劈图剪贴于表1。

表1的实验结果表明,使用软边反射腔型突出了 TEM_{00} 模。这从圆形平板腔加了软边光阑后接近阈值处的尖劈图可以看得很清楚。表中给出的功率半宽度已达到 $\phi 9$ 光阑衍

表1 软边与硬边振荡器腔激光输出远场图照相结果比较

腔型	硬边光阑半径 a	软边反射板有效半径 R_a	后腔板曲率半径	接近阈值处尖劈图	点数	功率半宽	高于阈值处尖劈图	点数	功率半宽
圆形平板腔	4.5mm 硬	未加	∞	见图3(a) 光泵电压 1400V	(5)	~ 0.31 mrad			
	4.5mm 硬	未加	∞				见图3(e) 光泵电压 1700V	(6)	
	未加	4.5mm 软	∞	见图3(b) 光泵电压 1450V	(7-8)	~ 0.1 mrad			
	未加	4.5mm 软	∞				见图3(t) 光泵电压 1650V	(8-9)	
非稳定腔(平凸)	4.5mm 硬	未加	5m	见图3(c) 光泵电压 1950V	(10)	~ 0.13 mrad			
	4.5mm 硬	未加	5m				见图3(g) 光泵电压 2200V	(12)	
	4.5mm	4.5mm 软	6m	见图3(d) 光泵电压 2000V	(11)	~ 0.12 mrad			
	4.5mm	4.5mm 软	6m				见图3(h) 光泵电压 2200V	(13)	

注: 尖劈图增加一个点意味着中心焦点功率度高一倍左右。

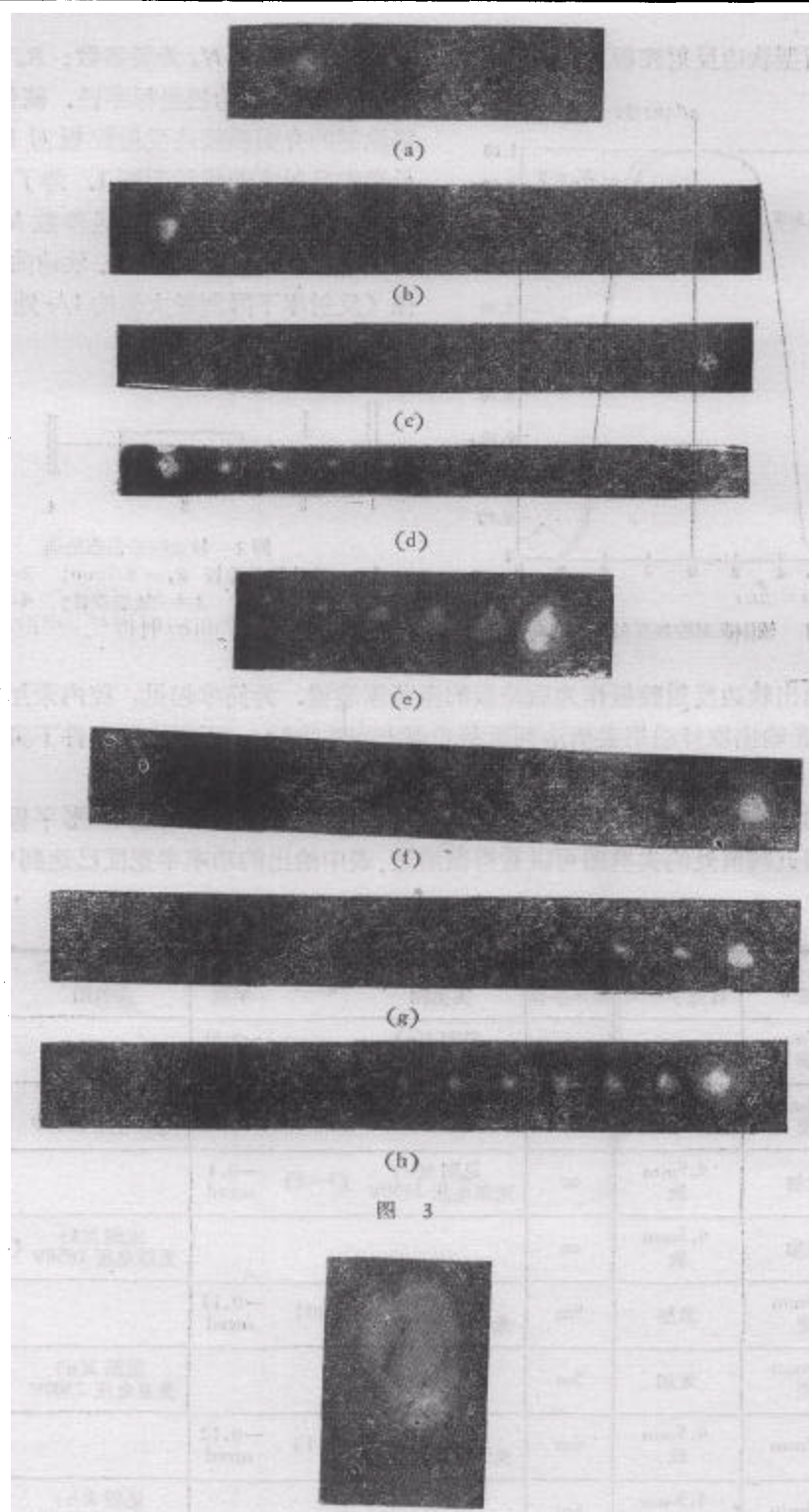


图 3

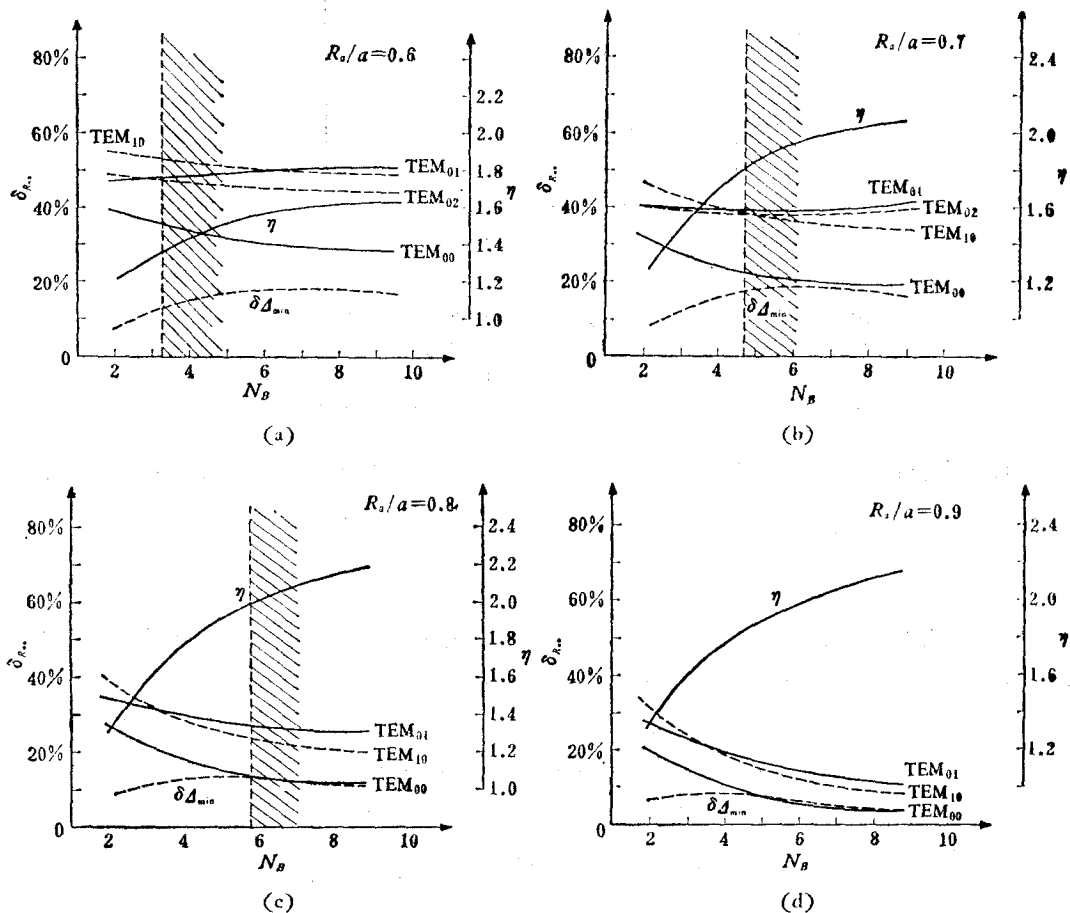
图 4 平板谐振腔使用软边反射腔板后，
近场花样呈环状结构

射半宽度, 亦即 TEM_{00} 模半宽度. 使用软边反射腔板使功率半宽度几乎改善了三倍.

振荡器后腔板改用软边反射腔板后近场花样如图 4 所示, 呈环状结构. 产生环状结构的原因不甚清楚. 如果同时加了 $a = 4.5\text{mm}$ 半径的硬光阑, 环状结构便消失了.

三、单程反射损耗计算及分析

这里我们将用数值计算法求得软边曲线为何种形状时对 TEM_{00} 模起振并且压制其它横模最为有利. 正如前面所指出的, 这里用来进行计算的模式是取的零级近似, 亦即不加软边时的本征模式, 没有计及软边对模式结构的影响, 与实际横模振荡情况相近, 但不完全相符. 但这对于选取最佳软边曲线形状仍有一定参考价值. 从有利于 TEM_{00} 模式起振出发, 我们在选取最佳软边曲线形状时, (这里变为选取超高斯形软边光阑级参数 N_s) 依据两个判据. 其一是最接近 TEM_{00} 的横模模损耗与 TEM_{00} 模损耗之差尽量大. 另一个是最接近 TEM_{00} 模的模损耗与 TEM_{00} 模反射损耗之比尽可能大. 根据这两个判据并考虑不大量增加腔内损耗的情况下, 求得最佳工作点. 应该指出, 上述“模损耗”主要是“软边反射损耗”, 即使用软边反射腔板后带来的反射附加损耗. 而衍射损耗对“模损耗”的贡献是相对小的.



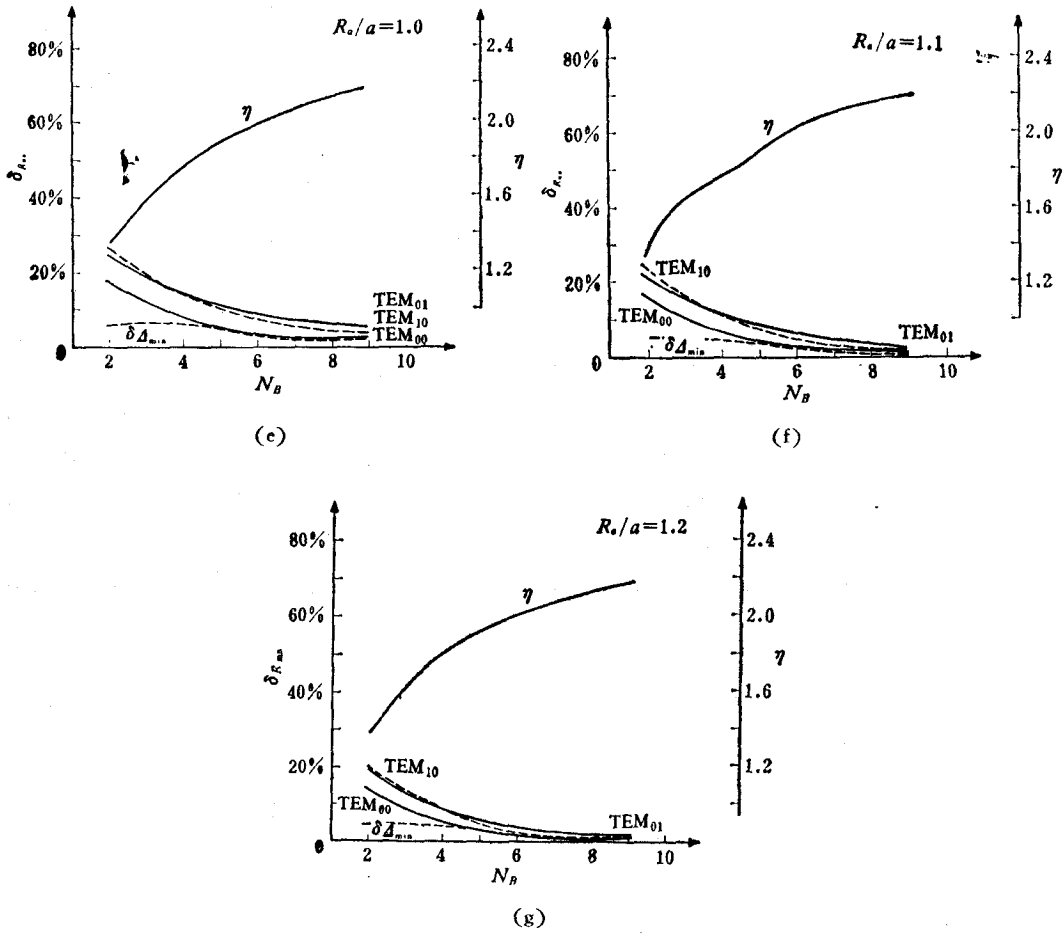


图5 对给定 R_0/a (软边有效半径/硬光阑半径) 各低阶横模反射损耗 $\delta\Delta_{\min} \equiv \delta_{R_{pq}} - \delta_{R_{00}}$ 为最接近 TEM_{00} 模的模损耗与 TEM_{00} 模的模损耗之差; $\eta \equiv \delta_{R_{pq}}/\delta_{R_{00}}$ 为最接近 TEM_{00} 模的模损耗与 TEM_{00} 模的模损耗之比值; $\delta\Delta_{\min}$ 使用左方坐标; η 使用右方坐标

对一个直径为 $2a$ 的平板谐振腔, Вайнштейн 导出了本征模的解析表达式^[3]为

$$f_{m,n}(r, \varphi) = J_m \left[(v_{m,n+1}) \frac{r}{a} \frac{1}{1 + \frac{\beta}{M} + i \frac{\beta}{M}} \right] \cdot \cos m\varphi, \quad (1)$$

式中 m 为角方向上的指标; n 为径向指标; r, φ 为极坐标; J_m 为第 m 级贝塞耳函数; $v_{m,n+1}$ 为第 m 级贝塞耳函数的第 $n+1$ 个根(零点);

$$\beta = \frac{\zeta\left(\frac{1}{2}\right)}{\sqrt{\pi}} = 0.824, \quad \zeta \text{ 为黎曼函数};$$

$$M = \sqrt{8\pi N} = \sqrt{8\pi \frac{a^2}{l\lambda}}, \quad N \text{ 为非涅耳数}.$$

当 $\frac{a^2}{l\lambda} \gg 1$ 时, $M \gg \beta$, 有

$$|f_{m,n}(r, \varphi)| = J_m \left(v_{m,n+1} \cdot \frac{r}{a} \right) \cdot \cos m\varphi. \quad (2)$$

$$|f_{m,n}(r, \varphi)|^2 = \left[J_m \left(v_{m,n+1} \cdot \frac{r}{a} \right) \right]^2 \cdot \cos^2 m\varphi. \quad (3)$$

(3) 式实际上是 $\text{TEM}_{m,n}$ 模的截面能量分布的近似表达式. 此外, Вайнштейн 还导出腔内衍射损耗的表达式

$$\delta_{imn} = 8v_{m,n+1}^2 \frac{\beta(M + \beta)}{[(M + \beta)^2 + \beta^2]^2}. \quad (4)$$

如前所述, 超高斯型软边反射腔板反射率 $R(r)$ 按下式定义:

$$R(r) = e^{-\left(\frac{r}{R_a}\right)^{N_B}}. \quad (5)$$

由于反射引起的损耗率为

$$s(r) = 1 - e^{-\left(\frac{r}{R_a}\right)^{N_B}}. \quad (6)$$

对于 TEM_{mn} 模的总反射损耗(相对值)为

$$\delta_{Rmn} = \frac{\int_0^a \int_0^{2\pi} |f_{mn}(r, \varphi)|^2 \cdot s(r) r dr d\varphi}{\int_0^a \int_0^{2\pi} |f_{mn}(r, \varphi)|^2 r dr d\varphi}. \quad (7)$$

将(6)式代入得

$$\delta_{Rmn} = \frac{\int_0^a \left| J_m \left(v_{m,n+1} \cdot \frac{r}{a} \right) \right|^2 [1 - e^{-\left(\frac{r}{R_a}\right)^{N_B}}] \cdot r dr}{\int_0^a \left| J_m \left(v_{m,n+1} \cdot \frac{r}{a} \right) \right|^2 r dr}. \quad (8)$$

令 $aR = r$, (8) 式可写成

$$\delta_{Rmn} = \frac{\int_0^1 |J_m(v_{m,n+1} \cdot R)|^2 [1 - e^{-\left(\frac{a}{R_a} R\right)^{N_B}}] R dR}{\int_0^1 |J_m(v_{m,n+1} \cdot R)|^2 R dR}. \quad (9)$$

对于特定的 m, n , δ_{Rmn} , 只与 a/R_a 及 N_B 两个参量有关, 即与取零级近似时硬光阑半径比软边有效半径的比值及超高斯软边光阑级参数 N_B 有关. 表 2 列出 $R_a/a = 0.8, N_B = 5$ 时计算出的一组 TEM_{mn} 模的反射损耗(软边引起)及衍射损耗值. 其余数值计算结果就不在这里一一列出了. 由表 2 我们看到 TEM_{10} 模的反射损耗与 TEM_{00} 模最为接近. 它们的差 $\delta\Delta_{\min} = 0.1032$, 它们的比值 $\eta = \frac{\delta_{R00}}{\delta_{R99}} = 1.8536$.

表 2 $R_a/a = 0.8, N_B = 5$ 的一组 δ_{Rmn} 和 δ_{imn} 数值计算结果

TEM_{mn} 模	TEM_{00}	TEM_{01}	TEM_{02}	TEM_{03}	TEM_{10}	TEM_{11}	TEM_{12}	TEM_{13}
δ_{Rmn}	0.1209	0.2546	0.2653	0.2663	0.2241	0.2706	0.2694	0.2686
δ_{imn}	0.0043	0.0226	0.0555	0.1030	0.0109	0.0365	0.0766	0.1315

用作图法综合整理数值计算结果可选取最佳工作点. 图 5 给出七组不同 R_a/a 参量条件下, 改变软边光阑级参数时 TEM_{mn} 模反射损耗变化曲线. 图中亦划出 $\delta\Delta_{\min} \equiv \delta_{Rpq} - \delta_{R00}$ (使用左方纵坐标, $\eta \equiv \frac{\delta_{Rpq}}{\delta_{R00}}$ (使用右方纵坐标) 两个判据的曲线. 其中 δ_{Rpq} 指最接近于 TEM_{00} 模反射损耗特定模 TEM_{pq} 的模损耗. 图 5 用 45° 倾斜的细实线标志出不合理的工作区域. 该区域之划定是考虑到不使零级近似的硬边光阑参数过大, 以致偏离了实际情况. 在图 5 中, 我们以软边光阑反射率近似为 0.5% 来规定最大硬光阑半径 a 或软边级参数 N_B . 即由 $e^{-\left(\frac{a}{R_a}\right)^{N_B}} \geq 0.005$, 则对于给定的 a/R_a 有

$$N_B \leq \log(-\log 0.005) / \log\left(\frac{a}{R_a}\right).$$

不符合此式的 N_B 规定为不合理工作区.

除去不合理工作区后, 由图 5 $\delta\Delta_{\min}$ 和 η 两组判据曲线我们找到, 当超高斯软边级参数 $N_B = 4.5$ 及软边有效半径与硬光阑半径之比为 0.7 时为对于 TEM_{00} 模最有利的起振条件. 此时, 对 TEM_{00} 模有 20% 的附加单程反射损耗. 而其它横模最小单程反射损耗也达 35% (TEM_{10}). 且 $\delta\Delta_{\min}$ 为最大值 15%. η 值达 1.75 倍, 也是较大的. 计算同时表明, 在使用软边反射腔的情况下, 衍射损耗是不重要的 (参见表 2). 它比软边反射损耗大约小一个数量级. 由于涂膜设备及设计加工的限制, 我们的实验未能取在最佳条件.

四、腔内软边光阑的制作方法

除上述在振荡器后腔板上涂软边反射膜制作软边光阑外, 还可以选择另外几种方法.

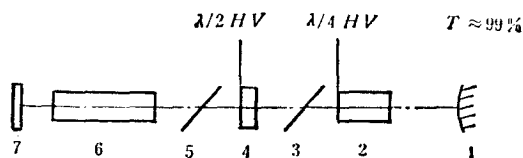


图 6 腔内电光软边光阑

1——后腔板; 2——电光调制晶体; 3——起偏器; 4——薄晶体, 晶体光轴与腔轴平行; 5——检偏器; 6——钽玻璃棒; 7——输出腔板

1) 使用透过式软边光阑将与反射式软边腔板产生同样的效果, 但有效口径小时将给制作工艺造成与反射式腔板同样的困难.

2) 图 6 表示在电光调 Q 振荡器腔内插入 4, 5 并使 4 (薄晶体, 可选用 KD^*P 晶体) 电极两端加 $\lambda/2$ 高压, 这样由 3, 4, 5 (起偏与检偏平行) 构成一个

电光软边光阑. 这是因为, 在薄晶体厚度很小时, 电极环附近形成高场强, 振荡光束不能通过电极环边缘区. 但因电场径向分布极不均匀, 在电极环中心区, 晶体内电场强度几乎为零, 振荡光束几乎可以全通过. 这就产生了透过式软边光阑的效果.

3) 如果把图 6 中的后腔板 1 加工成非球面, 有目的地使边缘光束更加发散, 其效果也等效于一个软边反射腔板.

以上几种措施均有可能起到有利于 TEM_{00} 模起振而达到改善激光振荡器输出亮度的效果.

感谢范正修、范瑞英同志设计、制作了性能良好的介质膜软边光阑.

参 考 文 献

- [1] J. Weaver, UCRL-50021-73-1 (1973), 48.
- [2] G. Charatis *et al.*, *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, 2 (1974), 317.
- [3] Л. А. Вайнштейн, *Ж. Э. Т. Ф.* **44** (1963), 1050.
- [4] A. G. Fox, T. Li, *Bell System Techn. J.*, **40** (1961), 453.
- [5] D. E. McCumber, *Bell. System Techn. J.*, **44** (1963), 333.
- [6] A. E. Siegman, *Proc. IEEE*, **53** (1965), 277.
- [7] Lee. W. Casperson, *Appl. Opt.*, **14** (1975), 1193.
- [8] H. Granek *et al.*, *Appl. Opt.*, **13** (1974), 368.

APODIZED APERTURE USED IN THE LASER OSCILLATOR

LIN ZUN-QI

ZHENG YU-XIA

YU WEN-YAN

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)