

片状放大器的研制

郑玉霞 余文炎 范滇元 唐贤忠 林礼煌 徐志明

(中国科学院上海光机所)

Development of disk amplifiers

Zheng Yuxia, Yu Wenyan, Fan Dianyuan, Tang Xianzhong, Lin Lihuang, Xu Zhimin
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

提要: 本文给出片状放大器系列在设计中所考虑和解决的问题。给出三种规格片状放大器的实验结果。

关键词: 片状放大器; 热畸变

一、引言

强光引起的自聚焦效应破坏了激光束的亮度,并由此导致的介质损伤,是限制固体钎玻璃高功率激光系统输出能力的主要原因。因此,高功率钎玻璃激光系统输出功率的提高,总是以扩大工作物质的口径为代价。实验证明,大口径的放大器以棒状介质组成是不适宜的,而应采用片状放大器。因为片状放大器是面泵浦的,允许通光口径很大,而工作物质的厚度较薄,这不仅可减少自聚焦的破坏,还可保持光泵的统一性。并且,因玻璃变热所引起的光程变化在光束截面内各点近似相等,因而“热光像差小”。另外,钎玻璃片倾斜于光路放置,又加大了内部光束的有效截面,进一步提高了负载能力。

但是,由于放大介质按布儒斯特角安放,片的尺寸比实际通光口径大一倍;当加工面形精度不够高时,这种大角度光学元件将引

入很大的像散;片的尺寸增加,将带来较严重的寄生振荡;片状放大器光泵效率较低,而且纵向光程长度短,每级片状放大器的增益比棒状放大器低。因此,在片状放大器系列的设计与研制中,要解决上述一系列问题。

二、片状放大器系列的研制

2.1 工作物质的选择

因目前国产的硅酸盐钎玻璃的受激发射截面只有 $\sim 1.2 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$,而系统中的功能元件(如隔离器、空间滤波器等)的光损耗偏高,形成低增益、高损耗。要在200 mm口径的片状放大器上输出 10^{12} W 级的激光功率,势必被迫超负载使用氙灯,这就影响了整个系统的稳定性和寿命,或者被迫减少功能元件,这又损害了激光束的质量。而磷酸盐钎玻璃具有合适的受激发射截面($\sim 3.5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$),在相同工作条件下,总增益比国

收稿日期: 1987年8月17日。

产的硅酸盐铍玻璃高1.7倍。考虑到目前使用的片状放大器的尺寸不很大,在有效控制寄生振荡的前提下,适当提高工作物质的受激发射截面,将有利于提高储能的利用率,降低激光系统的投资。因此我们选用磷酸盐铍玻璃作工作物质。

如前所述,限制激光功率密度的主要原因是介质中的自聚焦效应,激光束的自聚焦直接与材料的非线性折射率 n_2 有关,它由 B 积分来表征:

$$B = \frac{8\pi^2}{\lambda c} \times 10^7 \int_0^L \frac{n_2}{n_0} dz$$

B 值越大,自聚焦效应越强。磷酸盐铍玻璃的 n_2 比硅酸盐铍玻璃下降60~70%,因此,对于某一确定的 B 值来说,相同口径的磷酸盐铍玻璃放大器所能承受的功率密度将比硅酸盐铍玻璃高1.6倍,同时,磷酸盐铍玻璃的增益比硅酸盐铍玻璃高,因而,获得相同放大倍数所需要的磷酸盐铍玻璃的长度可以减小,这就进一步降低了 B 积分值,提高系统的功率负载能力。

2.2 寄生振荡的抑制

片状放大器的光泵效率远比棒状放大器低, $\beta \times D$ 的值比较大,在多灯高光泵条件下将容易产生寄生振荡,严重地限制了片状放大器的储能和可获得的增益系数。

一种可能发生的寄生振荡,是波长为 $1.054 \mu\text{m}$ 的荧光,经片侧表面多次全内反射引起的寄生振荡^[1],寄生振荡的阈值条件为:

$$Re^{n\bar{\beta}} = 1$$

其中 R 是片侧表面的反射率, $\bar{\beta}$ 是平均的增益系数, n 为铍玻璃的折射率。

另一种是光泵不均匀引起的表面寄生振荡^[2],这一类寄生振荡是沿表面发生的。若片表面的反射率为 R' ,沿表面的增益系数为 β' ,那么,寄生振荡的阈值条件为:

$$R'e^{\beta'D} = 1$$

如果玻璃片的铍浓度不过高,光泵又比较均匀,前一种寄生振荡容易发生,为此,必

须对铍玻璃片的侧表面进行处理,降低侧表面对 $1.054 \mu\text{m}$ 波长光的反射,并加以吸收。

在片状放大器系列(外形如图1所示)所包括的净通光口径 $\phi 100 \text{mm}$ 、 $\phi 150 \text{mm}$ 、 $\phi 200 \text{mm}$ 的片状放大器中,磷酸盐铍玻璃片的侧表面都包一层与磷酸盐铍玻璃折射率相近,并能吸收波长为 $1.054 \mu\text{m}$ 、 $1.35 \mu\text{m}$ 荧光的低熔点玻璃,包边玻璃对大角度入射的 $1.054 \mu\text{m}$ 波长光的剩余反射率小于1%。图2所表示的增益系数曲线,是在 $\phi 200 \text{mm}$,厚型片状放大器上获得的,在有寄生振荡(铍玻璃片侧表面没有包边)和消除寄生振荡以后(铍玻璃片侧表面有包边)的增益系数曲线,在有寄生振荡的情况下,增益系数曲线(1)在 $\beta D \approx 1$ 时,出现增益饱和,而在消除寄生振荡以后,增益系统曲线(2)在 $\beta D \approx 2$ 时仍未出现增益饱和。

2.3 光泵系统

片状放大器光泵效率较低,而且纵向光程长度短,每级放大器的增益只有棒状放大器的70%左右。为了获得足够的增益,要求有足够的输入能量,因而必须采用多灯,磷酸盐铍玻璃的荧光寿命($300 \mu\text{s}$ 左右)比硅酸盐铍玻璃几乎短一倍,为使氙灯的发光波形与荧光寿命相匹配,选用了高电压低电容的供电方式,这就要求解决高压绝缘及氙灯的自闪等问题。我们采用了引燃管内触发多灯点燃系统,原理如图3所示。这种电路,在电容器充电以后,氙灯两端仍处于地电位,因而,不会发生自闪和外放电,仅在引燃管导通的

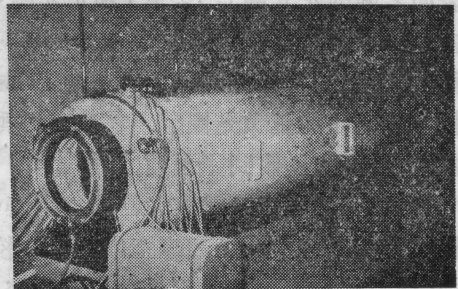


图 1

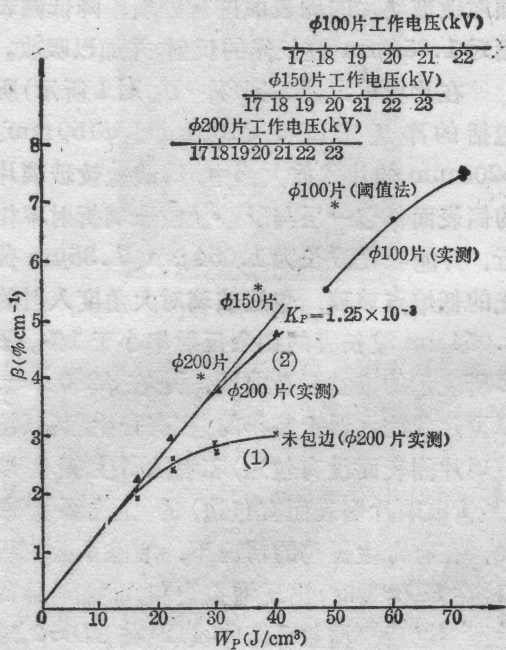


图 2

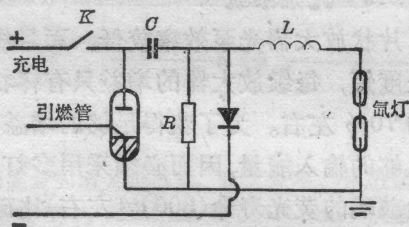


图 3

瞬间, 氙灯才能触发放电。实验表明, 此供电方式确实安全可靠。

2.4 对铍玻璃加工面形的要求

总体方案要求每个片表面的加工平面度应小于 0.09λ 。经验表明, 将铍玻璃片的各个表面之间的正光圈(凸公差)和负光圈(凹公差)相互补偿, 可使像散减小并降低了对片表面平面度加工精度的要求, 因此, 加工时有意控制片表面的正负光圈数, 在装校时再进行总体挑选组合, 收到了预期的效果。

另外, 为了延长片状放大器的使用寿命, 片状放大器是在 100 级超净室内进行装校密封, 然后提供使用。在片状放大器的内腔, 通过过滤过的干燥氮气, 排除氧气, 因为空气中

的氧气吸收氙灯的紫外光后迅速膨胀所产生的冲击波会影响激光束的质量。

三、实验结果

在片状放大器的设计中, 采用半经验公式:

$$\beta_0 = K_p \cdot W_p \quad (1)$$

W_p 是光泵能量密度, K_p 是光泵效率系数。

在通光口径为 200 mm 的磷酸盐铍玻璃片状放大器上, 我们测量了增益系数与输入光泵能量密度曲线^[1], 示于图 2。对磷酸盐铍玻璃, 在光泵脉宽等于荧光寿命的条件下, 取 $K_p = 1.25 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{J}$ 。 $\phi 100 \text{ mm}$ 、 $\phi 150 \text{ mm}$ 、 $\phi 200 \text{ mm}$ 片状放大器增益均匀性的设计值分别为 10%、13%、15%。设计参数见表 1。

3.1 $\phi 100 \text{ mm}$ 、 $\phi 150 \text{ mm}$ 、 $\phi 200 \text{ mm}$ 片状放大器增益及其均匀性

测量是采用阈值法进行的, 根据增益的要求, 选定谐振腔的腔板反射率 R_1 、 R_2 之后, 改变输入的光泵能量密度 W_p , 分别测出放大器在某处开始起振直至全口径进入振荡时需要的能量密度之差 ΔW_p , 我们就可分别求出增益系数、小信号增益及其增益的均匀性。

$$\beta = \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 \cdot R_2} \right) \quad (2)$$

$$G = e^{2L\beta} \quad (3)$$

由公式(1)得

$$\frac{d\beta}{\beta} = \frac{dW_p}{W_p} \quad (4)$$

L 是工作物质的长度。

用阈值法测量出三种片状放大器的增益系数值表示在图 2 上。其 $K_p > 1.25 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{J}$ 。增益的均匀性 $\phi 100 \text{ mm}$ 片状放大器 $\frac{d\beta}{\beta} = 4.5\%$, $\phi 200 \text{ mm}$ 片状放大器 $\frac{d\beta}{\beta} = 13\%$, 优于设计值。

3.2 总体运行的特性

片状放大器系列经过近百次的总体运

转。证明是安全可靠的。测得的增益特性如下:

脉冲宽度为 ns 时片状放大器的总体增益为

$E_{out}(J)$	$E_{in}(J)$	脉宽 (ns)	G(倍)	工作电压 (kV)
667	23.25	1.0	95.6 ($T_0=0.388$)	21
804	30.6	1.1	67.7 ($T_0=0.388$)	22 ($\phi 100321$ kV)

T_0 为系统的透过率。

各级片状放大器的增益为

口径 (mm)	级数 (台)	脉宽 (ns)	增益 (倍)	工作电压 (kV)
100	2	1.00	8	21
150	2	1.04	44	20
200	2	1.06	4.39	21

脉宽为 ps 时片状放大器的总体增益

$E_{out}(J)$	$E_{in}(J)$	脉宽 (ps)	增益 (倍)	工作电压 (kV)
94.4	2.78	99ps	119.4 ($T_0=0.28$)	20
131	3.81	104ps	101.1 ($T_0=0.34$)	20

脉宽为 ps 时各级片状放大器的增益

口径 (mm)	级数 (台)	脉宽 (ps)	增益 (倍)	工作电压 (kV)
100	2	87	8.2	20
150	2	80	5.6	20
200	2	83	4	20

(1) 实验中我们将片状放大器测得的实际增益视为小信号增益而反推 β 值, 结果比

阈值法测量的 β 值要低, 其中 $\phi 100$ mm 片状放大器偏差较大, $\phi 200$ mm 片状放大器偏差最小, 实际上不能认为是小信号增益。

(2) 图 2 中, $\phi 100$ mm 片状放大器是在高光泵密度下工作, β 值是取在 $W_p-\beta$ 曲线出现弯曲的部分, 而 $\phi 200$ mm 片状放大器 β 值是取在曲线接近线性的部分。另外设计曲线取 $K_p=1.25 \times 10^{-3}$, 相对三种尺寸的片状放大器是一个平均值, 再加上氙灯点燃相对于主脉冲的延迟时间没有调到最佳; 聚光器长期使用由于污染使反射率降低, 长期使用氙灯光效下降等因素的影响, 使 $\phi 100$ mm 片状放大器的实际测量增益值与设计值偏差大些。

目前, $\phi 200$ mm 片状放大器在工作电压为 20~21 kV 时已达到设计要求, $\phi 150$ mm 片状放大器在 20~22 kV、 $\phi 100$ mm 片状放大器在 23~25 kV 时均能达到最高的设计要求。由于在中等能量输入的条件下均已达到总体要求, 故高输入能量时的增益就没进行测量。

3.3 光泵热畸变及其热像差的恢复时间

由于片状放大器是面泵浦, 又是多灯, 因而, 光泵是比较均匀的, 经过片状放大器光束的质量基本上保持不变。用同轴全息干涉仪^[2]和列阵相机^[3]的测量都证明了这一点。

表 1 片状放大器设计参数

片实际尺寸 (mm)	钎玻璃片数 (片)	氙灯个数 (个)	最高增益 (倍)		增益均匀性
			ns	0.1ns	
100(1) (106×198×25)	6	16 ($\phi 20 \times 1200$)	(4.45)	(3.94)	10%
100(2)	6	16	14.24	14.26	
150(1) (158×308×30)	4	24	(2.31)	(2.29)	13%
150(2)	4	24	4.53	4.95	
200(1) (208×398×40)	3	32	(1.97)	(1.9)	15%
200(2)	3	32	3.45	3.42	
			(1.75)	(1.8)	

* 每支灯的电容量 $6.5 \mu f \times 7$, 电容器耐压 25 kV。

高。内蒙古农牧学院用激光照射奶山羊鲜精液,发现能提高精子活力和精液品质。授精后未见胎儿畸形,个体间也无明显差异。另外用激光照射绵羊离体精液,发现对谷草转氨酶(GOT)有激活作用。而小剂量激光对透明质酸酶有暂时性抑制作用。

激光医学新进展

激光医学领域内,除了治疗人体表面器官疾病的激光美容医疗仪已在国内外得到应用外,还研制成功率大于8W对宫颈糜烂和外阴疗效显著的小光刀、对软组织损伤疗效较高的气功信息治疗仪等,而且出现了能治疗内脏疾病的激光医疗系统。北京工业学院、北京光电技术研究所和上海黄浦区中心医院联合研制的激光光纤药头内窥镜碎石系统就是一个极好的例子。系统采用Nd:YAG激光器,光纤末端输出脉冲激光能量0~100

mJ,输出功率起伏 $<8\%$,脉冲宽度 $\geq 0.2\text{ms}$ 。石英光纤直径为400~500 μm ,对1.06 μm 波长透过率为80%。通过内窥镜将带有药头(直径2mm,长1.2cm)的光纤导管送入胃中,激光象引爆雷管一样,将药头爆炸,爆炸产生的强大冲击波击碎胃石,然后由胃镜取出碎石。已成功粉碎的胃石体积大于 $8\times 10\times 6\text{cm}^3$ 。此外,该系统还可治疗膀胱、输尿管结石和胆结石。其优点是体积小、操作方便、安全可靠、噪声低,可大大减轻患者痛苦。中国科学院安徽光机所使用准分子激光器、Nd:YAG激光器和 CO_2 激光器在激光血管成形术和心肌消融方面进行了系列实验,取得了许多重要的实验结果,为激光治疗人体腔内的心血管疾病提供了重要的临床应用数据。

作者谨向提供本年度激光发展动态和信息的个人及单位深表谢意。

(上接第79页)

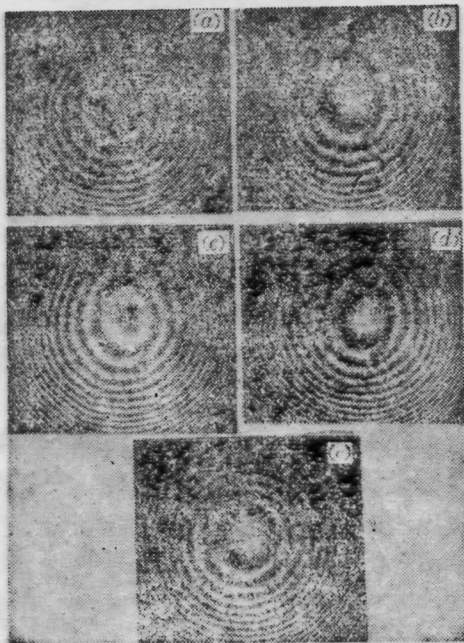


图 4

(a) $t=0$; (b) $t=5''$; (c) $t=20''$;
(d) $t=50''$; (e) $t=8100''$

我们用同轴全息干涉仪,测量了片状放大器的热像差及其恢复时间,图4给出 $\phi 200\text{mm}$ 片状放大器在光泵之后的几个典型时刻的干涉图样。结果表明,放大器各片之间的充氮气间隔受热影响比较严重。但是,这种热波的传输属于慢过程,不会对被放大的激光束带来影响。然而,由于这种热气流,使片产生不均匀的温升,则需要2小时才能恢复到常态。所以,该激光系统的工作周期,必须限定在2小时以上,否则,必须考虑附加的波差畸变,并对靶面的调焦量给予相应的修正。

参 考 文 献

- 1 郑玉霞 *et al.*, 中国激光, 10(2), 74~76 (1983)
- 2 余文炎, 王桂英, 光学学报, 2(4), 349 (1982)
- 3 梁向春 *et al.*, 激光, 8(8), 56 (1981)