

文章编号:1001-5078(2007)04-0326-03

高功率激光装置预放大系统自激振荡抑制技术研究

丁磊,赵润昌,梁樾,董一方,贾伟,李明中,隋展,蒋东镔,唐晓东
(中国工程物理研究院激光聚变研究中心,四川 绵阳 621900)

摘要:分析了高功率激光装置预放大系统内外各种自激振荡的来源,通过理论计算和实验验证提出了各种自激振荡的抑制方法,并在实践中得到验证。成功解决了预放大系统内外的自激振荡问题,保障了系统的安全工作,提高了系统输出信噪比。

关键词:自激振荡;预放大系统;信噪比

中图分类号:TN248 **文献标识码:**A

Research of the Techniques of Restraining the Self-oscillations in the Preamplifier System of High Power Laser Facility

DING Lei, ZHAO Run-chang, LIANG Yue, DONG Yi-fang, JIA Wei,
LI Ming-zhong, SUI Zhan, JIANG Dong-bin, TANG Xiao-dong
(Research Center of Laser Fusion, Mianyang 621900, China)

Abstract: There are various kinds of the self-oscillations in the preamplifier system of the high power laser facility, the origins of them were analyzed in theory. The techniques of restraining the self-oscillations were put forward in this paper, and the techniques were proven in experiments that they could overcome the problem, ensure the systematic safety work, and improve the outputs SNR of the preamplifier system.

Key words: self-oscillations; preamplifier system; SNR

预放大系统是某高功率激光装置的关键系统之一,位于前端与主放大器之间,其主要设计功能是对前端提供注入种子光源进行适当地能量放大,并对其时间、空间、波前等特性进行控制之后输出满足主放大级需求的激光脉冲。

预放大系统采用多程放大模式,与传统的 MO-PA 系统相比,大幅提高了放大器储能的利用率,减小了系统体积,提高了系统建造的性能价格比,但是高增益带来一个负面结果是自激振荡的机会大大增加。自激振荡危害极大,一是会大量消耗放大器的上能级储能从而降低主激光的增益;二则自激振荡产生的大能量激光会对光学元件造成毁灭性损伤;三是降低主激光脉冲的信噪比,严重的自激振荡会使整个激光系统完全瘫痪,因此对自激振荡的抑制成为激光系统正常运转的关键之一。

对于一个复杂的激光系统,光学元件表面的剩

余反射是自激振荡形成振荡腔的必要条件,若振荡腔内有足够的增益就会形成自激振荡^[1]。多程放大模式中,腔镜(0°高反)的使用减小了振荡腔的损耗,降低了起振阈值,大大提高了自激振荡成腔的可能性。因此对于高增益多程系统而言,自激振荡技术的研究具有重要价值和实用意义^[2-5]。本文针对某高功率激光装置预放大系统各种主要可能产生的振荡腔进行了细致的分析和研究,其研究成果已在装置中得到考核和验证。

1 系统概述

高功率激光装置预放大系统采用了液晶光阀加多程放大的总体技术路线,集成了诸如液晶空间光调制器、 $\phi 20\text{mm}$ 玻璃放大器、 $\phi 40\text{mm}$ 玻璃放大器、

作者简介:丁磊(1972-),男,中物院激光聚变研究中心工程师,从事高功率固体激光技术研究。

收稿日期:2006-07-28;**修订日期:**2006-10-08

静态磁光隔离器、静态真空空间滤波器单元技术。系统总小信号增益约为 5×10^6 , 其中 $\phi 20\text{mm}$ 玻璃放大器小信号增益 45 倍, $\phi 40\text{mm}$ 玻璃放大器小信号增益 7 倍; 光路布局为双通套双通结构, 自激控制技术的研究结果直接关系到全系统设计的成败。图 1 是系统光路图。

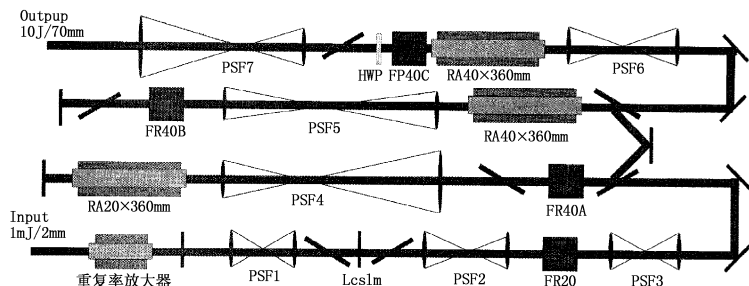


图1 系统光路示意图

Fig.1 schematic of the preamplifier system

2 自激振荡谐振腔分析与实验结果

根据谐振腔理论, 自激形成的边界条件是腔内增益 G 与谐振腔损耗 R 的乘积等于 1, 即:

$$GR = 1$$

$$R = TR_1 R_2$$

其中, G 为谐振腔内的增益; T 为腔内损耗; R_1, R_2 分别为成腔的两个反射面的反射率。

预放大系统中的反射面有: 双通腔镜、空间滤波器窗口、透镜、空间滤波器小孔板。为了躲避鬼光束束滤波器窗口做了大角度倾斜 ($5^\circ \sim 10^\circ$), 因此窗口成腔的可能性极小。考虑到 $\phi 20\text{mm}$ 放大器的高增益与腔镜的高反射率具有典型性, 本文将对以下几种主要谐振腔型进行分析和讨论, 典型腔型分别为 $\phi 20\text{mm}$ 双通放大级腔镜与 $\phi 20\text{mm}$ 棒端面腔型, $\phi 20\text{mm}$ 双通放大级腔镜与空间滤波器小孔板腔型, $\phi 20\text{mm}$ 双通放大级腔镜与 $\phi 40\text{mm}$ 双通放大级腔镜腔型, 双通放大级腔镜与透镜形成笔形光束腔型。

2.1 $\phi 20\text{mm}$ 双通放大级腔镜与 $\phi 20\text{mm}$ 棒端面形成的谐振腔

腔镜与棒端面形成的谐振腔示意图如图 2 所示。对于这种谐振腔, 谐振腔内增益为 2500 倍, 腔内损耗与腔镜反射率都约为 1, 因此要求棒端面反射率 $R_{\phi 20}$ 小于 $1/2500 = 0.04\%$, 这对于目前镀膜水平几乎是不可能做到的, 尤其是边缘部分反射率更高, 实验中观察到的环形自激振荡即是棒端面边缘所带来的。

解决措施: 一是增加磁光隔离器或电光开关, 这两种方法都大大增加了系统的复杂性, 目前阶段仍可考虑更为简洁的方法; 二是谐振腔的失谐调整, 即

将放大器倾斜放置或将放大器端面磨斜, 放大器倾斜放置会在一定程度上影响主激光的通过, 增加近场的不均匀性。因此放大器棒端面磨斜成了必要而根本的解决措施。目前棒端面磨斜角度已由 2° 调整至 5° , 理论模拟结果良好, 正在开展实验验证。

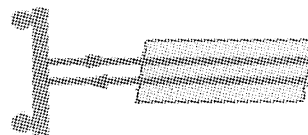


图2 腔镜与棒端面形成的谐振腔

Fig.2 resonance cavity between the lens and the end of the rod

2.2 $\phi 20\text{mm}$ 双通放大级腔镜与空间滤波器小孔板形成的谐振腔

空间滤波器 SF4 小孔板与腔镜形成的谐振腔, 由于此腔内没有隔离器件, 腔型损耗小易于起振。示意图如图 3 所示。

谐振腔内双程增益为 2500 倍, 腔内损耗与腔镜反射率都约为 1, 因此要求小孔板反射率 $R_{\text{小孔}}$ 小于 $1/2500 = 0.04\%$ 。这同样是很难做到的。解决措施: 一是增加磁光隔离器或电光开关, 这两种方法同样大大增加了系统的复杂性; 二是谐振腔的失谐调整, 这要求对小孔材料、表面形态、几何形状进行特殊的设计。

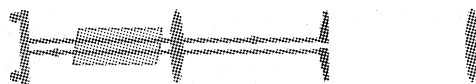


图3 小孔板与腔镜形成的谐振腔

Fig.3 resonance cavity between the pinhole and the lens

为了降低反射, 表面的发黑打毛是必要的, 打毛的目的是使小孔板形成漫反射体, 增大散射损耗, 同时小孔板采用大角度倾斜, 增大谐振腔失谐损耗。实验中采用了伞形小孔板, 实验表明发黑打毛的伞形乌钢小孔板成功抑制了空间滤波器 SF4 小孔板与腔镜之间的自激振荡。

其他滤波器 (诸如 SF3、SF5) 小孔板同样也会与此腔镜形成振荡, 但由于其间都有磁光隔离器以及空间滤波器 SF4 的限制, 起振的相对几率要小很多, 实验中 SF3 曾使用了未毛化处理的小孔板, 产生了微弱的自振, 虽然不严重影响放大器增益, 但不利于系统输出信噪比的提高, 设计时应该尽量避免。

2.3 $\phi 20\text{mm}$ 双通放大级腔镜与 $\phi 40\text{mm}$ 双通放大级腔镜之间的自激振荡

两个双通放大单元之间的自激振荡是多程放大技术的关键限制之一, 也是预放大系统中最为复杂,

增益最高的单元,对它的抑制成败关系到整个系统设计和运行的成败。

此谐振腔可以等效为图4所示的谐振腔。腔内总增益 $G = 2000 \times 50 = 10^5$, 腔反射率 $R_1 = R_2 = 1$, 系统损耗分为两部分 $T = T_0 \times T_{FR}$, 其中正向通过损耗 $T_0 = 60\% \times 60\% = 36\%$, 两台磁光法拉第隔离损耗 $T_{FR} = 1/100^2$, 因此系统损耗约为 3.6×10^{-5} , 根据自激振荡形成的边界条件得到 $GT = 1$, 因此还有3.6~5倍的增益需要抑制。目前所能采取的措施一是增加隔离措施(磁光隔离器或电光开关), 同上这样大大增加了系统的复杂性, 如非不得已, 一般不建议采用; 二是谐振腔的失谐调整。下面主要对谐振腔失谐的方式和作用进行分析。

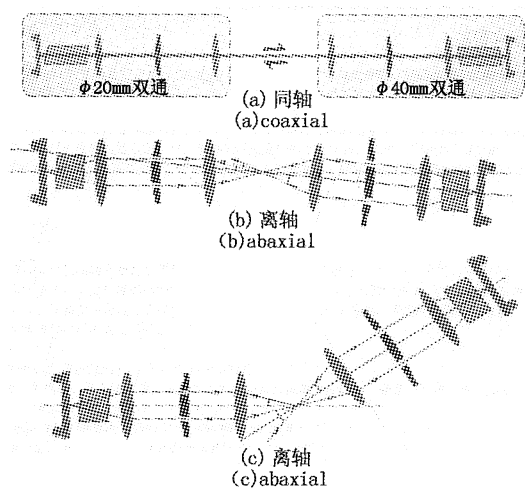


图4 两级双通构成的谐振腔

Fig. 4 schematic of the two dual-pass cavity

若空间滤波器内没有小孔, 光束可以从任意角度形成闭路循环, 从而自振将无从抑制。因此小孔的限制是首要的。

若采用同轴双通结构(图4(a)), 光束虽然受到限制, 但由于主激光的要求, 两个小孔将是完全耦合的, 自激振荡仍然畅通无阻, 而且方向性更好。

离轴双通结构的采用是失谐调整的有效措施, 这种方案中又有两种方法造成谐振腔的失谐, 一是两极空间滤波器小孔的失配(见图4(b)), 即 $l_1/f_1 \neq l_2/f_2$, 其中 f_1, f_2 分别为相邻两个透镜的焦距, l_1, l_2 分别为两个滤波器的小孔间距的一半。由于小孔的失配, 主激光要从第一个双通单元进入第二个双通单元, 要求两个双通单元的光轴有一个夹角 $\theta = l_2/f_2 - l_1/f_1$, 这样第二个双通出来后光束将更加偏离第一个双通单元的光轴(偏离角为 2θ), 这样谐振腔的失谐角度为 2θ ; 第二种方法是对离轴的方向进行选

择, 走同向离轴(见图4(c)), 由图可知带来的谐振腔失谐角度为 $2\gamma = 2 \times l_2/f_2$ 。可见同向离轴得到的失谐角较大。

预放大系统中所采用的参数为: $l_1 = 1.5\text{mm}$, $l_2 = 2.5\text{mm}$, $f_1 = 1200\text{mm}$, $f_2 = 600\text{mm}$ 。得到的失谐角分别为 $2\theta = 5.8\text{mrad}$, $2\gamma = 8.3\text{mrad}$ 。实验表明采用同向离轴(失谐角为 8.3mrad) 方式成功地抑制了两个双通之间的自激振荡。而采用异向离轴(失谐角为 5.8mrad) 方式仍有微弱的自激振荡。实验同时也表明两级磁光法拉第的使用是必需的。

2.4 笔形光束

笔形光束是系统鬼光束的一个特殊情况, 即能够通过滤波器小孔的那一部分鬼光束。笔形光束的危害在于方向性好, 形成反激光则原路返回, 若隔离不利将造成严重后果; 形成自激振荡则在空间上与主激光在一起, 时间谱上它有可能先于主脉冲, 从而影响输出脉冲的信噪比和近场质量, 甚至造成光学元件的损伤。它利于控制的特点在于与主脉冲的增益竞争中不占优势。通过在空间滤波器前加入 $1/4$ 波片或 90° 转子与静态法拉第的组合, 可以控制笔形光束的增益, 控制的优劣与偏振片和法拉第的质量有关。

3 总结

本文通过针对某高功率激光装置预放大系统自振现象进行了较为详细的理论分析与实验研究, 讨论了预放大系统中各种主要自激振荡的产生原因和对各种自激振荡腔型的抑制技术, 其经验对于高增益复杂系统设计具有重要参考价值。目前, 该系统已成功运行1000余次, 未出现自振失控现象, 奠定了装置全系统成功运行的重要基础。

参考文献:

- [1] W 克希奈尔. 固体激光工程[M]. 华光译. 北京: 科学出版社, 1983.
- [2] LIU Hong-jie, ZHU Qi-hua, JIANG Dong-bin. Restraint of the self-excitation oscillation in the two-pass amplification[J]. High power laser and partial beams, 2004, 12 (s1), 179-181. (in Chinese)
- [3] Simmons W W. Argus laser system: performance summary[J]. Appl. Opt., 1978, 17: 999-1005.
- [4] Hunt J T. Present and future performance of the Nova laser system[J]. Optic Eng., 1989, 28 (40): 461-468.
- [5] McMahon J M. The upgraded phebus II laser system [J]. IEEE J Quantum Electron, 1981, 17 (9): 461-468.