

神光装置放大自发辐射输出特性测量

蔡奇注 黄关龙

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 讨论了大型激光装置放大自发辐射输出的一般特性, 给出了神光装置放大自发辐射特性的测量结果。

关键词 放大自发辐射, 高功率激光系统。

1 引 言

对于激光核聚变装置, 为了实现高温高密度压缩, 在主激光束到来之前, 直径仅为几十微米的微小靶球上不允许有被先期杂光引发损伤、甚至被打掉的情况发生, 否则将导致总体实验失败。几百微焦耳能量就足以摧毁一个微球靶, 所以通常对激光核聚变装置的信噪比要求^[1]为 10^6 或者更高。激光核聚变装置从总体上排除了不应该出现的各种杂光以后, 放大的自发辐射则是到达靶球上的噪声光的唯一来源。有必要对神光装置的放大自发辐射输出特性进行测试, 并把它降低到总体物理实验允许的程度之下, 以保证总体实验的正常进行。

有关放大自发辐射对激光系统增益特性影响的讨论已经很多^[2~7], 但是关于激光系统放大自发辐射输出特性的报道不多, 本文就这个问题进行较为深入的研究。

2 放大的自发辐射输出的一般特性

放大的自发辐射 (Amplified Spontaneous Emission) 本质上属于激光范畴^[8], 和通常所说的激光不同之处在于它不是受谐振腔的模式控制, 而是受放大介质增益特性所控制。

自发辐射光的发射方向、相位、偏振、频率都是无规分布的, 因而其方向性、相干性和单色性都很差, 但是这些自发辐射光如果发生在增益介质中, 自发辐射得到受激放大而成为放大的自发辐射。当激光介质的增益足够高, 放大自发辐射特性就会被增益特性所控制, 使其输出特性和初始的自发辐射有很大的差异。在激光系统中, 增益介质通常按传输方向 (z) 排列, 所以在 z 方向的自发辐射获得的增益远高于其他方向。这里还存在正向行进和逆向行进的两个分量, 本文讨论的就是与激光束同轴同方向行进的正轴向放大自发辐射。

激光介质中任一部分产生的自发辐射光都能被其后续部分增益介质所放大。显然, 发生在激光系统最前端自发辐射光历经几乎整个放大链, 所得到的增益也最大。所以靶面接受到的放大自发辐射能量的主要部分来源于第一台放大器中的自发辐射。

放大自发辐射的初始信号为微弱的自发辐射光，历经整个放大系统后所得到的总能量仍然很小，始终处于小信号增益状态，也就是说自发辐射受到的是线性放大，因而放大的自发辐射基本保持了种子信号的分布特性。放大自发辐射具有方向、频率、位相、偏振的随机概率分布。激光放大系统中有多台空间滤波器，可以推断通过增益系统而能够到达靶面的放大自发辐射只能是可穿越所有空间滤波器小孔的那部分能量。于是放大自发辐射的方向分布函数在传输过程中被截断，被完全限制在激光系统允许接受角以内。

放大自发辐射原则上和激光介质粒子数反转同时产生，是一长脉冲过程。由于激光系统中放置了光开关，这些光学时间窗口的存在使得激光系统在主激光到来之前接近关闭状态。于是通过激光系统的放大自发辐射的脉冲长度受到剪裁。同样放大自发辐射还要受到激光系统增益分布函数(频率和时间的分布函数)、选偏振器的作用。

综上所述，放大自发辐射具有均匀的远场分布、光滑的时间分布和低相干度等优越的用常规激光技术所难以得到的输出特性，因而已经被用来作为大型宽频带激光装置的光源^[9]，另一方面放大自发辐射又带有大型激光系统增益特性的标志，具有很小的发散全角，较小的脉冲长度和单一的偏振态。

对于大型激光装置来说放大自发辐射是不可避免的噪声光，因为它是沿着主激光束同一光路行进的，要想抑制放大自发辐射，只能在系统中设置一些空间、时间、偏振和频率光瞳，利用主激光和放大自发辐射包络特性的差异对放大自发辐射输出特性进行剪裁。可以预料，这方面的工作做得越精细，放大自发辐射输出的包络特性与主激光特性也越靠近。

3 神光装置放大自发辐射输出特性测量

神光装置是一台两路输出高功率钎玻璃激光装置，每个激光束通光口径为 $\phi 200\text{ mm}$ ，总输出功率 10^{12} W ，总体光路如图 1 所示。

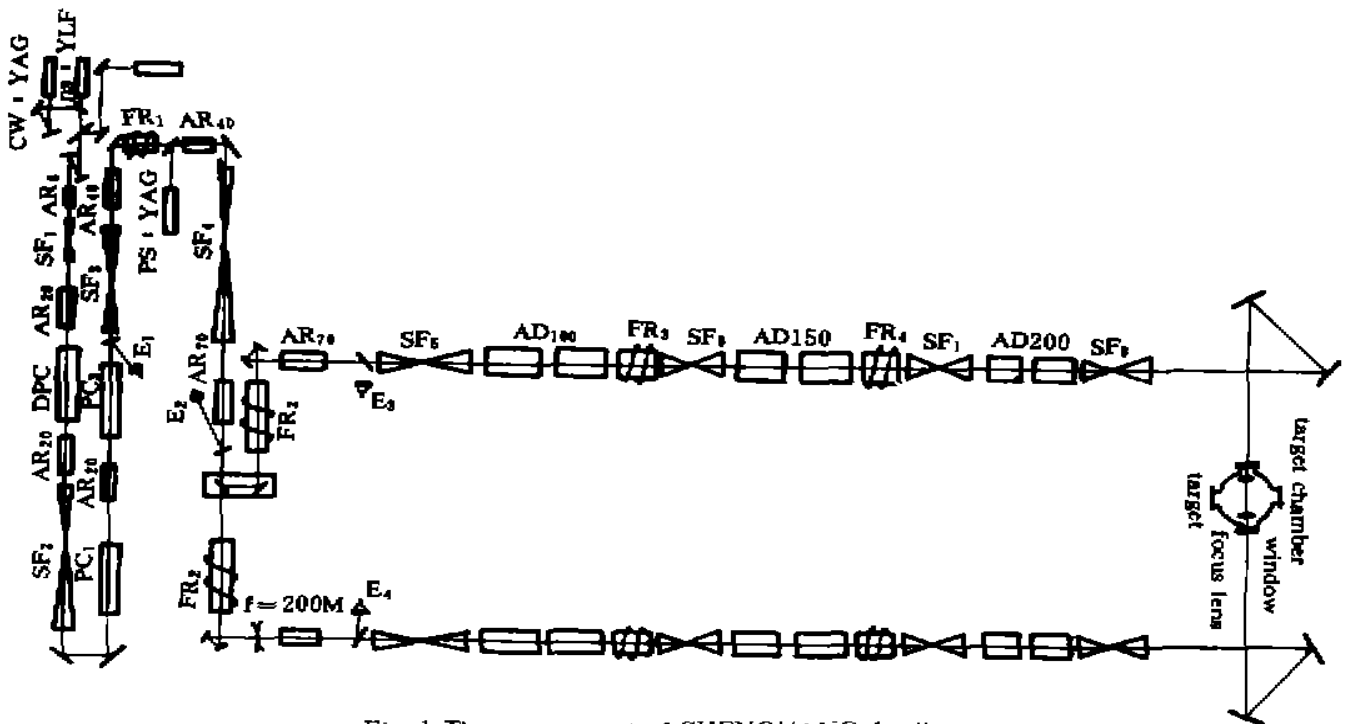


Fig. 1 The arrangement of SHENGUANG facility

神光装置除振荡器不工作外，其余各级放大器均按最高工作电压光泵，各级隔离器正常

工作,空间滤波器小孔尺寸均按正常输出条件选择,此时,激光系统无主激光产生,只有放大的自发辐射存在,所以测得的输出光就是神光装置的放大自发辐射。

放大自发辐射测量装置的光路如图 2 所示。整个装置安放在真空靶室 1 内,真空度为 1.33×10^{-4} Pa。聚焦靶镜 2 的焦距为 340 mm。为了选出照射到靶球上的那部分放大自发辐射能量,在靶点位置安放一个和常用的靶球尺寸相当的小孔光阑 3,其直径为 $119 \mu\text{m}$ 。小孔光阑后面是一台经过标定的高灵敏激光卡计 5。为去除氙灯杂光,在卡计前安放了一块红外滤光片。神光装置有结构完全相同的南路和北路两路输出,为了节省工

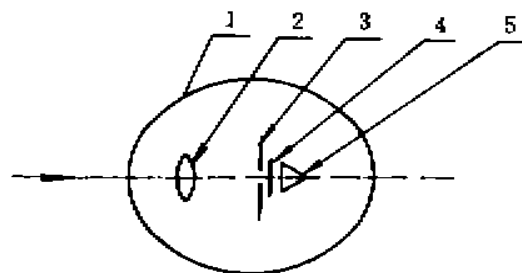


Fig. 2 Experimental set-up used for measurement of ASE

作量,抽测其中一路的放大自发辐射。在北路系统上所进行的 11 次总体实验结果如表 1 所示。

Table 1. The measured results of the ASE on the north beam of SHENGUANG facility

No.	ASE (mJ)	note
1	>5	SFA ₂ ϕ 2.8 mm
2	—	check if any light from Xe lamps deposits on the target
3	>5.8	SFA ₂ ϕ 2.8 mm
4	0.13	The amplifier A ₂ does not work
5	0.46	SFA ₂ ϕ 0.7 mm
6	0.32	SFA ₂ ϕ 0.7 mm
7	0.64	SFA ₂ ϕ 0.7 mm
8	0.66	the ϕ 119 mm pinhole was taken away
9	0.54	pinhole was replaced by Al target (thickness-0.2 μm ; incident angle-0°)
10	0.14	pinhole was replaced by Al target (thickness-0.2 μm ; incident angle-5°)
11	0.42	pinhole was replaced by Al target (thickness-0.2 μm ; incident angle-10°)

将实验结果分析如下:

No. 1 测得北路激光系统的 ASE > 5 mJ, 为验证此测量的可靠性,做了两次判断实验,其一是测试结果中是否包括氙灯杂光? 考虑到可能进入到靶点位置的氙灯杂光主要贡献应来自于末级放大器,在 No. 2 测试中只开动末级 ϕ 200 mm 片状放大器,卡计未接受到任何信号,表明测量结果中不包含氙灯杂光。其二是测试结果究竟是放大自发辐射,还是别的信号? 因为放大自发辐射主要来源应当是第一级放大器中的自发辐射经过全系统放大后的输出能量,如果第一级放大器 A₂ 不工作,系统的放大自发辐射应有大幅度下降。No. 4 实验证明了这一点。当 A₂ 不光泵时,系统放大自发辐射降低到 0.13 mJ, 约为原值的 1/50。已知 A₂ 的小信号增益为 100 倍,所以放大自发辐射测量值下降的幅度也是合理的,从而证实了所测信号确为放大自发辐射,但是它的量值远超过原定指标值 (< 2 mJ)。

为了降低放大自发辐射输出能量,一个有效措施是减小前级空间滤波器小孔的尺寸,使小孔直径由原值 ϕ 2.8 mm 缩小到 ϕ 0.7 mm (相当于 5 倍衍射极限),相应地空间滤波器小孔

面积缩小了 16 倍。No. 5~7 实验表明, 通过抑制前级放大器进入全系统的放大自发辐射能量的方法, 使系统输出的放大自发辐射总能量降低了一个多量级, 基本上按照滤波小孔面积缩小的同样倍数下降。此现象和自发辐射远场分布均匀的特征相符合。此时, 北路激光系统达到靶球上的放大自发辐射为 0.64 mJ, 达到了预定的指标(< 2 mJ), 见表 1~No. 7。

将卡计前面的 $\phi 119 \mu\text{m}$ 小孔取走, 测量神光装置输出放大自发辐射的总量, 实验 No. 8 表明此时所测得的放大自发辐射能量值并没有增加, 仍为 0.66 mJ。可见放大自发辐射的焦斑尺寸小于 $\phi 119 \mu\text{m}$, 即放大的自发辐射的发射全角在 0.35 mrad 以内。这是因为前级空间滤波小孔尺寸减小到 5 倍衍射极限, 能够进入放大系统的自发辐射的方向性已经限制在 5 倍衍射极限之内, 而放大自发辐射在激光系统放大传输过程中始终为弱光, 只附加线性波像差, 并不产生非线性波像差, 因此系统放大自发辐射保持很好的方向性是可以理解的。

图 3 是氙灯波形, 其脉冲宽度约为 550 μs 。图 4 是放大自发辐射波形, 可以看到放大自发辐射是长脉冲时间过程, 具有光滑的时间波形, 脉冲宽度约为 120 μs 。

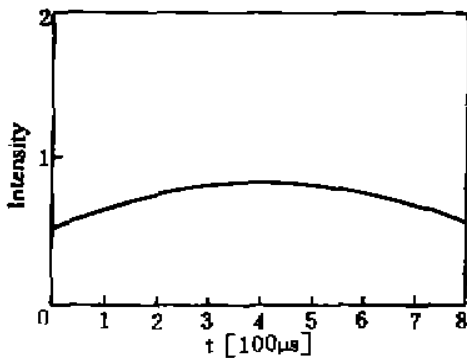


Fig. 3 Typical Xe-lamp light pulse. Pulse duration is about 550 μs

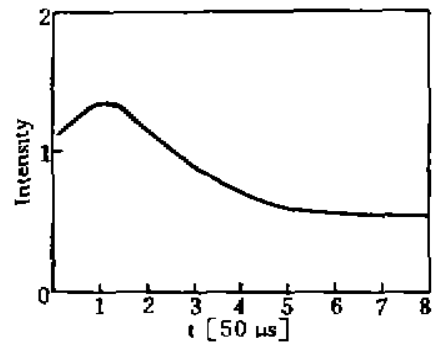


Fig. 4 The ASE pulse of SENGUANG facility. The width is about 120 μs

虽然北路激光系统的放大自发辐射小于 2 mJ, 已达到了预定指标, 但是否同时也满足了物理实验的要求呢? 将 $\phi 119 \mu\text{m}$ 的小孔从靶面上取走, 代之以 0.2 μm 铝膜靶, 检查 0.7 mJ 左右的放大自发辐射能否打坏薄膜靶。No. 9 实验中, 当铝膜靶法线与激光成 0° 放置时, 放大自发辐射击穿铝膜靶, 并使放置在铝靶后面的激光卡计接收到 0.54 mJ 能量。No. 10 实验中, 当铝靶成 5° 放置, 铝膜靶被击穿, 这时的穿透能量为 0.14 mJ。No. 11 实验中, 铝膜靶被击穿, 透过能量为 0.42 mJ。三次实验表明, 有一部分放大自发辐射能量仍能从穿孔中通过, 即放大自发辐射在靶面上达到的能量密度已经超过薄膜靶的破坏阈值。铝的密度 $\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$ 。假设光斑面积为 $\phi 119 \mu\text{m}$, 厚度为 0.2 μm , 则铝靶的总质量约为 0.006 μg 。已知铝的激光烧蚀率为 158 $\mu\text{g/J}$ ^[10, 11], 靶面能量耦合系数为 0.15, 所以激光穿透上述铝靶所需激光能量估算为 0.25 mJ, 和实验测量结果相吻合。应该说, 本实验给出的测量结果是较为可靠的, 这是因为铝靶处于真空环境, 而且激光束在靶面的分布又是相当均匀的。

实验结论是, 北路激光系统放大自发辐射输出 < 0.7 mJ, 但仍足以严重破坏 0.2 μm 铝膜靶 ($0^\circ \sim 10^\circ$ 放置)。

讨 论 1) 对于神光装置而言, 有害的放大自发辐射应该是指主激光束到来之前那部分放大自发辐射能量, 而测得的却是激光系统光泵期间的放大自发辐射总量, 实验结果偏于保守。作者认为放大自发辐射总量指标可以高于靶破坏阈值。通常纳秒级主激光设置在放大自

发辐射峰值位置的前面,所以在本文的具体条件下,放大自发辐射总量指标选为靶破坏阈值的两倍应是安全的。2) 测试光路中插入了一块只允许 $1.054 \mu\text{m}$ 主激光通过的红外滤光片。作者现在认为这一技术措施是需要推敲的。因为测试目的之一就是测量有无氙灯杂光到达靶面,显然在测试系统中加入阻挡氙灯杂光进入的红外滤光片是不合理的。但是具体分析实际测试条件可以看出,尽管使用了红外滤光片,并不会对整个测量结果带来影响。从光路图 1 可知,激光器到靶场之间安排有空间滤波器、多个单波长高反射率导向镜以及 20 多米长的光路,对于定向性极差而光谱又很宽的氙灯杂光来说它的传输损耗极大,几乎不可能到达靶球。所以在正常情况下,不必担心氙灯杂光会带来干扰。

参加本工作的还有神光装置运行组和测试组的同志们,特此致谢!

参 考 文 献

- [1] Koichi Yamakawa, Hiroyuki Shiraga, Yoshiaki Kato, Generation of a high-energy picosecond laser pulse with a high-contrast ratio by chirped-pulse amplification. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, QE-27(2): 288~294
- [2] D. D. Lowenthal, J. M. Eggleston, ASE effects in small aspect ratio laser oscillators and amplifiers with nonsaturable absorption. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1986, QE-22(8): 1165~1173
- [3] G. Haag, M. Munz, G. Marowsky, Amplified spontaneous emission (ASE) in laser oscillators and amplifiers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1983, QE-19(6): 1149~1160
- [4] H. Maeda, A. Yariv, Narrowing and rebroadening of amplified spontaneous emission in high gain laser media. *Phys. Lett. (A)*, 1973, 43(4): 383~385
- [5] L. Allen, G. I. Peters, Amplified spontaneous emission and external signal amplification in an inverted medium. *Phys. Rev. A*, 1973, 8(4): 2031~2047
- [6] U. Ganiel, A. Hurdy, G. Neumann *et al.*, Amplified spontaneous emission and amplification in dye-laser systems. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1975, QE-11(11): 881~892
- [7] J. B. Moreno, G. A. Fisk, J. M. Hottnam, Amplified spontaneous emission and gain-saturation nonlinearity in high-gain optical amplifiers; The biased amplifier. *J. Appl. Phys.*, 1977, 48(1): 238~242
- [8] 伍长征, 王兆永, 陈凌冰等, 激光物理学. 上海, 复旦大学出版社, 1989: 37
- [9] H. Nakano, K. Tsubakimoto, K. Yagi *et al.*, Irradiation uniformity improvement by incoherence of amplified spontaneous emission in glass laser fusion systems. *CLEO'90 paper*, CWF41
- [10] R. L. Steyman, J. T. Schriempf, L. R. Hettche, Experimental studies of laser-supported absorption waves with 5-ns pulses of 10.6μ radiation. *J. Appl. Phys.*, 1973, 44(8): 3675~3681
- [11] K. L. Klosterman, S. R. Byron, Measurement of subsonic laser absorption wave propagation characteristics at 10.6μ . *J. Appl. Phys.*, 1974, 45(11): 4751~4759

Measurement of Amplified Spontaneous Emission on SHENGUANG Facility

Cai Xijie Huang Guanlong

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

(Received 28 March 1995)

Abstract The general performance of amplified spontaneous emission (ASE) in large-scale laser systems is discussed. The measured ASE results on TW SHENGUANG facility are given.

Key words ASE, high-power laser system.