

大口径有源反射镜片状放大器增益特性实验研究

刘 晶^{1,2} 施翔春¹ 李 磊¹ 程小劲¹ 杨中国¹ 王建磊¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全国态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)
² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 构建了一套氙灯抽运, 大口径有源反射镜片状放大器实验装置。实验研究了布儒斯特角入射的有源反射镜钕玻璃放大器的增益特性。钕玻璃几何尺寸为 890 mm×450 mm×50 mm, 掺杂浓度为 1.2% (质量分数)。最佳延时下, 测得不同电压下的小信号增益系数和储能效率。充电电压为 22 kV, 氙灯放电脉宽为 0.51 ms 时, 储能效率为 1.94%, 小信号增益系数为 0.0371 cm⁻¹。实验研究了横向放大自发辐射(ASE)和氙灯发光效率对增益特性的影响。

关键词 激光器; 激光放大器; 有源反射镜; 布儒斯特角; 氙灯

中图分类号 TN248 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0402007

Experimental Research on Gain Characteristic in Large Aperture Active Mirror Slab Amplifiers

Liu Jing^{1,2} Shi Xiangchun¹ Li Lei¹ Cheng Xiaojin¹ Yang Zhongguo¹ Wang Jianlei¹

(¹ Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The structure of large aperture active mirror slab amplifier is presented, which is pumped by Xe-lamps. The application of active mirror in Nd: glass laser amplifier is explored. The size of Nd:glass is 890 mm×450 mm×50 mm. Doping density is 1.2% of mass fraction. The small signal gain coefficient and energy storage efficiency of different voltages are measured at the best delay time. The energy storage efficiency is 1.94% and the small signal gain coefficient is 0.0371 cm⁻¹ when the charging voltage is 22 kV and the Xe-lamp's discharging pulse width is 0.51 ms. Experiments are designed to research the effect of lateral amplified spontaneous emission (ASE) and luminous efficiency of Xe-lamp on the small signal gain coefficient.

Key words lasers; laser amplifier; active mirror; Brewster angle; Xe-lamp

OCIS codes 140.3280; 140.3460; 140.3538

1 引 言

有源反射镜构型广泛应用于激光二极管抽运的薄片激光器^[1,2], 多采用正面或背面抽运方式。与透射式构型相比, 有源反射镜构型主要有两个方面的优点^[3]: 一方面, 光束可以实现单程双通放大, 单程增益高, 能量提取效率高; 另一方面, 其采用面抽运方式, 表面的热量可以通过直接接触背面的流体而进行冷却, 更加有效地解决激光晶体的热效应问题, 非常适合连续运转高功率激光系统。德国斯图加特大学

Giesen 等^[4,5]研制的薄片激光器, 日本大阪大学^[6,7]报道的低温陶瓷激光器和法国 Chanteloup 等^[8]激光装置均采用了有源反射镜构型。国内, 中国工程物理研究院等^[9]采用有源反射镜构型实现了低重频的薄片激光系统。20 世纪 80 年代 Abate 等^[10~12]在美国罗彻斯特激光能源实验室开展大口径有源反射镜片状放大器的研究, 其方案采用小角度入射, 介质表面镀有利于抽运光反射和种子光入射的高损伤阈值双色介质膜。本文利用水平偏振的种子光以布儒斯特角

收稿日期: 2012-10-25; 收到修改稿日期: 2012-12-10

作者简介: 刘 晶(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail: liujing3718@163.com

导师简介: 施翔春(1969—), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要从事全固态激光器方面的研究。

E-mail: shixc@siom.ac.cn(通信联系人)

入射,实现入射光束的零反射,降低了镀膜的技术难度和成本,同时装置实现布局模块化,钕玻璃对称排布,未吸收的部分抽运光用于另一块钕玻璃的抽运,充分利用抽运光,提高抽运效率。

本文构建了一套大口径有源反射镜片状放大器实验装置,研究了其增益特性和储能效率,探索有源反射镜构型在高能钕玻璃激光器上的应用。测得不同电压下的小信号增益系数和储能效率,并实验探究了横向自发辐射放大(ASE)和氙灯发光效率对增益特性的影响。

2 实验装置

大口径有源反射镜片状放大器结构主要由窗口镜、钕玻璃、氙灯和腔反射镜组成,装置俯视图如图1所示。放大器由氙灯抽运,每片钕玻璃背面放置26支氙灯,垂直排列,氙灯外径为25 mm、内径为21 mm,极间距为430 mm,4灯串联为一回路,共13路。钕玻璃对称排布,未吸收的部分抽运光可以被另一块钕玻璃吸收,充分利用了抽运光;同时氙灯后面采用镀银的铜板作为反射器,用来反射抽运光以增加储能效率。钕玻璃的几何尺寸为890 mm×450 mm×50 mm,周边有15 mm的包边,用来抑制自激振荡的产生,掺杂浓度为1.2%(质量分数)线性折射率为1.528,受激发射截面为 $3.9 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。窗口玻璃的前后表面镀有1053 nm的增透膜,腔反射镜前表面和钕玻璃后表面镀有1053 nm的高反膜。整个装置处于密封状态,以保证腔内的洁净度。实验时在灯箱和腔内冲入流动的

氮气来冷却氙灯放电产生的热量。

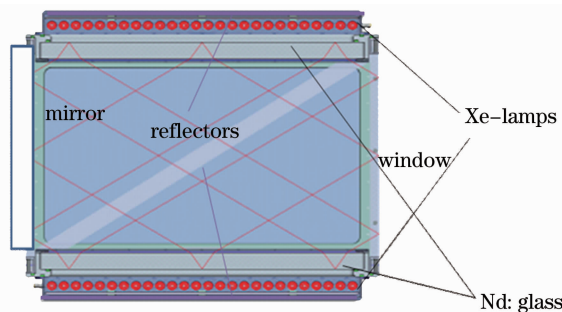


图1 有源反射镜片状放大器装置图

Fig. 1 Device figure of active mirror slab amplifier

实验光路如图2所示,采用一台Nd:YLF激光器,其输出重复频率为1 Hz、中心波长为1053 nm、光斑直径为1 mm、脉宽为10 ns、最大输出能量为10 mJ,出射光为水平偏振的种子光。种子光经过5倍的扩束镜扩束后,光斑直径为5 mm,经反射镜 M_1 、 M_2 透过窗口玻璃,以布儒斯特角入射进入第一片钕玻璃,经后表面反射后在前表面透射,再经腔反射镜反射后,同样以布儒斯特角入射进入第二片钕玻璃,最后经窗口出射,用能量计(THORLABS, Dual-Channel Power and Energy Meter, PM320E)探测能量并记录,调节入射光束,使其从窗口玻璃的中心部分入射,且出射光斑和入射光斑在窗口玻璃前表面重合,保证激光光斑经过钕玻璃的中心部分。水平偏振种子光以布儒斯特角入射实现了信号光的零反射,避免了镀膜,降低了技术难度,节约了造价。两片玻璃成“V”字型,竖直方向有约 1° 夹角,用来抑制两玻璃片之间的自激振荡。

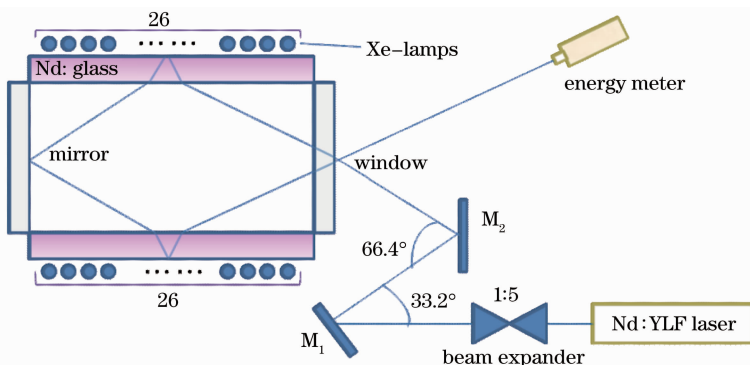


图2 实验光路图

Fig. 2 Schematic drawing of the optical measurement system

无抽运时,能量计探测种子光经钕玻璃后的能量为 E_1 ;抽运状态,能量计探测种子光经钕玻璃放大后的能量为 E_2 。种子光能量放大倍数为

$$\beta = \frac{E_2}{E_1}, \quad (1)$$

钕玻璃单程小信号增益系数 g 为^[13]

$$g = \frac{\ln \beta}{L} + \alpha, \quad (2)$$

$$L = \frac{4d \sqrt{1+n^2}}{n}, \quad (3)$$

式中 L 为光在传输方向上所经过的路程, d 为铍玻璃的厚度, n 为铍玻璃的线性折射率, α 为铍玻璃的动态损耗系数和静态损耗系数的差值, 取经验值 0.002 cm^{-1} 。

放大器的储能效率^[14]

$$\eta = \frac{W_{st}}{W_p}, \quad (4)$$

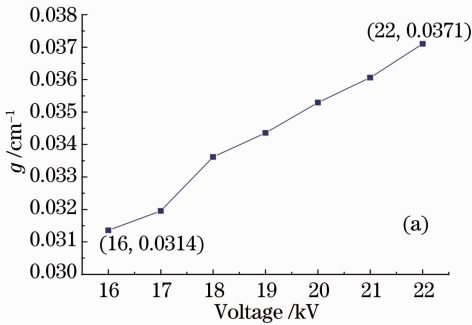
$$W_{st} = \frac{h\nu g}{\delta}, \quad (5)$$

$$W_p = \frac{E_p}{V_p} = \frac{1/2CU^2 \times 13}{V_p}(1 - \gamma), \quad (6)$$

式中 W_{st} 为铍玻璃的储能密度, W_p 为抽运密度, δ 为铍玻璃的受激发射截面, h 为普朗克常数, ν 为激光光波频率, E_p 为抽运的总能量, V_p 为抽运的总体积, C 为储能电容器的电容, U 为充电电压, $\gamma=15\%$ 为电路传输损耗。

3 实验研究

实验中种子激光器和能量计与放大器装置在相互分离的平台上, 以防止高压放电对种子光和能量计的电干扰; 能量计探头前放置滤光片并加遮光罩, 以防止杂散抽运光的影响。



3.1 探测小信号增益系数和储能效率

调节种子光相对抽运脉冲的延时, 找到最佳值。在不同充电电压下, 分别探测 E_1 和 E_2 , 记录实验数据, 如表 1 所示。利用(2)式和(3)式计算小信号增益系数和储能效率。小信号增益系数、储能效率和充电电压的关系如图 3 所示。实验结果表明: 充电电压为 16 kV 时, 小信号增益系数为 0.0314 cm^{-1} , 储能效率为 3.10%; 加大充电电压, 小信号增益系数不断增加, 而储能效率直线下降, 充电电压达 22 kV 时, 小信号增益系数增加到 0.0371 cm^{-1} , 储能效率下降为 1.94%。

表 1 不同充电电压下的 E_1 和 E_2

Table 1 E_1 和 E_2 with different voltages

Voltage /kV	E_1 /mJ	E_2 /mJ
16	1.24	2.50
17	1.18	2.42
18	1.20	2.54
19	1.19	2.58
20	1.18	2.62
21	1.18	2.67
22	1.18	2.73

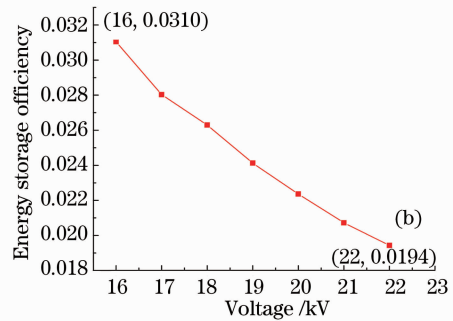


图 3 (a) 不同电压下的小信号增益系数; (b) 不同电压下的储能效率

Fig. 3 (a) Small signal gain coefficient with different voltages; (b) energy storage efficiency with different voltages

3.2 探究影响小信号增益系数的主要因素

从上述实验结果中可以看出, 随着电压的增大, 储能效率在不断下降, 22 kV 时的储能效率相对于 16 kV 下降了 37.4%。分析可能的原因有: 随着抽运功率的增强, 横向 ASE 的影响增大^[15]; 实验中采用的氙灯放电脉冲较窄, 高的峰值电流, 会造成氙灯发光效率下降, 同时出现光谱蓝移, 使铍玻璃吸收能量减少。设计相应的实验来探究上述因素对增益特性的影响。

3.2.1 横向 ASE 对小信号增益系数的影响

设计实验方案, 去掉周边的 28 支氙灯、采用中

间部分 24 支进行抽运, 实验光路不做改动, 如图 4 所示。记录实验数据 E_1 和 E_2 , 如表 2 所示。通过这样的设计减少抽运的面积从而减小横向 ASE, 而种子光经过区域的抽运强度几乎不变(种子光光斑很小且通过铍玻璃的中心部分, 去掉的氙灯对种子光增益影响很小)。从表 3 可以看出, 减小了抽运面积后小信号增益系数没有明显变化(微弱的下降认为是抽运减小的影响), 从而可以判断横向 ASE 不是限制储能的主要因素, 可以通过增加抽运能量提高增益。

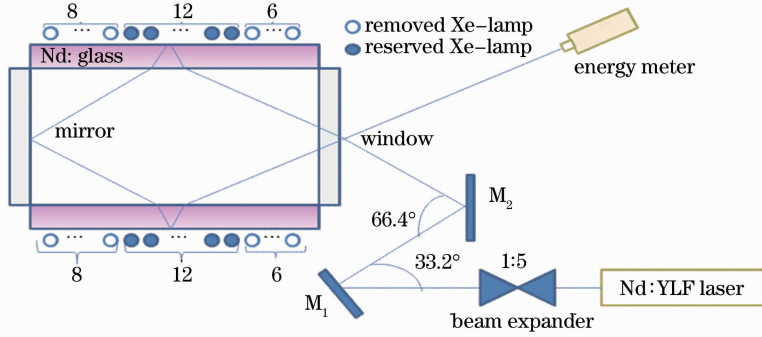


图 4 判断横向 ASE 对小信号增益系数影响的光路图

Fig. 4 Schematic drawing of estimation on effect of lateral ASE on small signal gain coefficient

表 2 24 支氙灯抽运,不同充电电压下的 E_1 和 E_2

Table 2 E_1 and E_2 of different voltages pumped by 24 Xe-lamps

Voltage /kV	E_1 /mJ	E_2 /mJ
16	1.28	2.44
17	1.28	2.55
18	1.27	2.62
19	1.28	2.69
20	1.28	2.78
21	1.22	2.73
22	1.20	2.72

3.2.2 氙灯发光效率对小信号增益系数的影响

氙灯放电峰值电流过大,发光效率会下降,同时氙灯光谱会出现蓝移,对应钕玻璃吸收谱线的能量减少。判断氙灯光效的影响,需满足条件:相同抽运能量,不同峰值电流。实验只利用其中一片钕玻璃,在后腔镜放置镀有 1053 nm 高反膜的反射镜 M_3 使种子光双程通过钕玻璃,如图 5 所示。设计对比实验,采用相应一侧的 24 支氙灯抽运,充电电压为 15.6 kV,进灯能量为 12.9 kJ,记录实验数据 $E_1 = 1.12$ mJ, $E_2 = 2.14$ mJ;改变氙灯分布,去掉 24 支氙灯中的偶数氙灯,重新组成回路,充电电压为 22 kV,进灯能量为 12.9 kJ,记录实验数据 $E_1 = 1.11$ mJ, $E_2 = 1.95$ mJ。充电电压越高对应的氙灯放电峰值电流越大。实验结果如表 4 所示,计算可得,由于高峰值电流使氙灯发光效率下降造成小信号增益系数下降 12.7%。

表 3 不同抽运面积下的小信号增益系数

Table 3 Small signal gain coefficients of different pump areas

Voltage /kV	g / cm^{-1}	
	(24 Xe-lamps)	(52 Xe-lamps)
16	0.0289	0.0314
17	0.0308	0.0320
18	0.0322	0.0336
19	0.0332	0.0344
20	0.0344	0.0353
21	0.0356	0.0361
22	0.0362	0.0371

表 4 不同条件下的小信号增益系数

Table 4 Small signal gain coefficient under different conditions

	24 Xe-lamps, V=15.6 kV	12 Xe-lamps, V= 22 kV
g / cm^{-1}	0.0291	0.0254

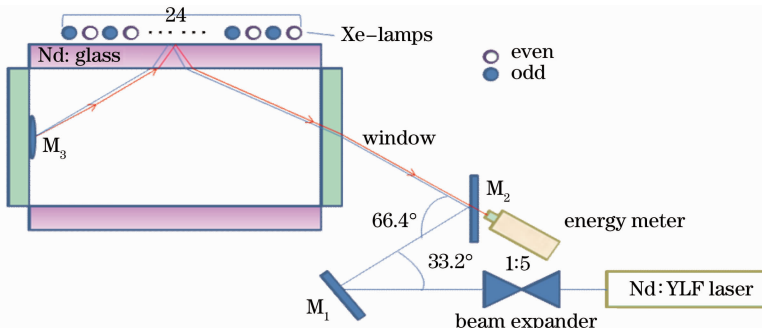


图 5 氙灯发光效率对小信号增益系数影响的光路图

Fig. 5 Schematic drawing of estimation on effect of Xe-lamp luminous efficiency on small gain coefficient

4 结 论

探究了氙灯抽运、布儒斯特角入射大口径有源反射镜片状放大器的增益特性和储能效率。测得不同电压下的小信号增益系数和储能效率。充电电压 22 kV 下,小信号增益系数为 0.0371 cm^{-1} ,储能效率为 1.94%。实验探究了影响增益特性的主要因素。实验结果表明,横向 ASE 不是影响增益的主要因素,可以通过增加抽运能量来提高增益,而高峰值电流下氙灯发光效率下降对其造成一定的影响。

实验研究了有源反射镜构型钽玻璃放大器的增益特性,为建立此构型下理论分析模型提供了可靠的实验数据,对其在大口径工作物质中的应用具有参考价值。采用水平偏振的种子光以布儒斯特角入射,实现入射光束的零反射,降低了镀膜的技术难度和成本。下一步计划,通过对能源配置的进一步优化和结构上的适当调整,希望能够在增益和储能效率上有进一步的提高。

参 考 文 献

- 1 Liang Lü, Qing Wang, Jiangfeng Zhu *et al.*. Efficient mode-locked picosecond Yb:YAG ceramic laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2012, **10**(s1): s11410
- 2 Liu Yang, Wang Chao, Tang Xiaojun *et al.*. Laser diode-pumped four Nd:YAG disks laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1202007
刘 洋, 王 超, 唐晓军等. 激光二极管抽运四片串联 Nd:YAG 薄片激光器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(12): 1202007
- 3 J. A. Abate, L. Lund, D. Brown *et al.*. Active mirror: a large-aperture medium-repetition rate Nd: glass amplifier[J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(2): 315~316
- 4 A. Giesen, H. Hugel, A. Voss *et al.*. Scalable concept diode-pumped high-power lasers[J]. *Appl. Phys. B*, 1994, **58**(5):

- 365~372
- 5 Stewen, K. Contag, M. Larionov *et al.*. A 1-kW CW thin disk laser[J]. *Selected Topics in Quantum Electron.*, 2000, **6**(4): 650~657
- 6 H. Furuse, J. Kawanaka, T. Saiki *et al.*. Total-reflection active-mirror laser with cryogenic Yb:YAG[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(21): 3439~3441
- 7 H. Furuse, J. Kawanaka, N. Miyanaga *et al.*. Zig-zag active-mirror laser with cryogenic Yb³⁺:YAG/YAG composite ceramics[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(3): 2448~2455
- 8 J. C. Chanteloup, H. Yu, G. Bourdet *et al.*. Overview of the Lucia laser program: towards 100 Joules, nanosecond pulses, kW averaged power, based on ytterbium diode pumped solid[C]. *SPIE*, 2005, **5707**: 105~116
- 9 Jiang Dongbin, Duan Wentao, Xu Meijian *et al.*. High-power laser diode end-pumped Yb:YAG repeat frequency laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1831~1834
蒋东滨, 段文涛, 徐美健等. 高功率激光二极管端面抽运重复频率 Yb:YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1831~1834
- 10 J. A. Abate, L. Lund, D. Brown *et al.*. Active mirror: a large-aperture medium-repetition rate Nd: glass amplifier[J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(2): 351~361
- 11 D. C. Brown, J. A. Abate, L. Lund *et al.*. Passively switched double pass active mirror system[J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(9): 1588~1594
- 12 D. C. Brown, R. Bowman, J. Kuper *et al.*. High average power active-mirror amplifier[J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(5): 612~618
- 13 W. Koechner. Solid-State Laser Engineering[M]. Sun Wen *et al.* transl. 5 edition. Beijing: Science Press, 2002
克希奈尔 W. 固体激光工程[M]. 孙 文等译,第 5 版,北京: 科学出版社, 2002
- 14 Wang Chengcheng, Zheng Wanguo, Yu Haiwu *et al.*. Research of small signal gain character in large aperture square beam slab amplifiers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(2): 155~158
王成程, 郑万国, 於海武等. 大口径方光束片状放大器小信号增益实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(2): 155~158
- 15 Feng Guoyin, Lü Baida. Amplified spontaneous emission in multi segment amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **24**(6): 489~494
冯国英, 吕百达. 多段阵列式钽玻璃放大器中放大自发辐射问题的研究[J]. *中国激光*, 1997, **24**(6): 489~494

栏目编辑: 宋梅梅