



·大科学装置运维·

400 mm 口径片状放大器增益性能退化研究及维护策略

刘 勇, 吴文龙, 陈文棋, 林东晖, 熊 迁, 王 琳, 王振国, 陈 林

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 400 mm 口径片状放大器增益性能退化是国内外惯性约束聚变 (ICF) 激光装置长期运行所面临的主要问题之一, 直接影响激光装置的输出能力与光束质量。对造成片状放大器增益退化的因素开展了分析, 建立了各因素的归一化理论分析模型, 并利用 2 组九片长的 400 mm 口径 4×2 组合式片状放大器系统开展了实验研究, 无维护策略条件下经过 10 年、3 000 发次运行后增益性能平均退化了 10.2%, 符合理论预期。以此制定了大口径片状放大器的维护策略, 实现了系统长期的增益性能退化率优于 1.5%, 满足 ICF 激光装置长期运行要求。

关键词: 惯性约束聚变; 片状放大器; 增益退化; 维护

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220363

Gain degeneration and maintance project of 400 mm aperture disk amplifier

Liu Yong, Wu Wenlong, Chen Wenqi, Lin Donghui, Xiong Qian, Wang Lin, Wang Zhenguo, Chen Lin

(Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: One of the main problems occur during inertial confinement fusion (ICF) laser facility's long-term operation is the gain degeneration of the 400 mm aperture slab amplifier, which will affect the output of the facility and the laser beam quality. A study on gain degeneration causing by several factors was carried out and a normalization theory model from all the factors has been built. The test was accomplished on two groups of 400 mm aperture, 4×2 composition multi-segment slab amplifier with each group includes 9 slabs. The gain degenerating rate was about 10.2% after 10 years, 3 000 shots of work which is in accordance with the theoretical predication. A maintance project for the large aperture slab amplifier has been drawn up to keep the gain degeneration less than 1.5% during long-term operation of the ICF facility.

Key words: inertial confinement fusion, slab amplifier, gain degenerate, maintance

2022 年末, 随着劳伦斯利弗莫尔国家实验室 (LLNL) 宣布美国国家点火装置 (NIF) 首次实现能量净增^[1], 惯性约束聚变 (ICF) 研究领域再度成为举世关注焦点。研制大型可靠的激光驱动器, 是实现 ICF 目标的基本条件。目前, 国际上具有代表性的用于 ICF 研究的高功率激光装置, 除了 NIF, 还有法国兆焦耳装置 (LMJ)^[2] 等。为了获得所需要的巨大能量, NIF 和 LMJ 均采用了氙灯泵浦钨玻璃片状放大器作为主放大系统。片状放大器提供了装置超过 99% 的能量与功率^[3], 其增益性能对装置在非线性 B 积分受限与储能受限条件下 1 053 nm 激光输出能量与功率的上限以及光束质量有重要影响^[4], 其增益性能退化则是 ICF 激光装置长期运行所面临的主要问题之一^[5]。ICF 激光装置的激光束数多达几十束、甚至几百束, 比如美国 NIF 装置激光束数为 192 束, 包括了约 10 000 台能源电容器、约 8 000 支氙灯、约 3 000 片钨玻璃片、约 1 500 件隔板玻璃, 以及数万件镀银聚光反射器, 更换维护周期长达数年且花费巨大。因此准确预测以上器件局部性能下降对装置增益性能的退化影响并制定合理的维护策略对保障装置长期稳定运行尤为关键。本文对造成片状放大器增益退化的因素开展了分析, 建立了各因素的归一化理论分析模型, 并利用两组九片长的 400 mm 口径 4×2 组合式片状放大器系统开展了实验研究, 无维护策略条件下经过 10 年、3 500 发次运行后增益性能平均退化了 10.2%, 符合理论预期。以此制定了大口径片状放大器的维护策略, 该策略使系统长期的增益性能退化率 ≤ 1.5%, 满足 ICF 激光装置长期运行要求。

* 收稿日期: 2023-01-09; 修订日期: 2023-08-10
联系方式: 刘 勇, 249133939@qq.com。

1 增益退化理论模型及实验

目前 NIF、LMJ 以及国内 ICF 激光装置采用的片状放大器均为 400 mm 口径 4×2 组合式片状放大器,其结构为高度方向为四片钕玻璃片叠加,形成四个通光子口径,宽度方向有两个通光子口径,总共八个口径形成 4×2 的一个束组通光结构,氙灯从两侧对钕玻璃片进行泵浦,如图 1 所示。钕玻璃尺寸为 810 mm×460 mm×40 mm,与光束呈布儒斯特角放置,每个子口径均可提供 400 mm×400 mm 的正方形通光口径。

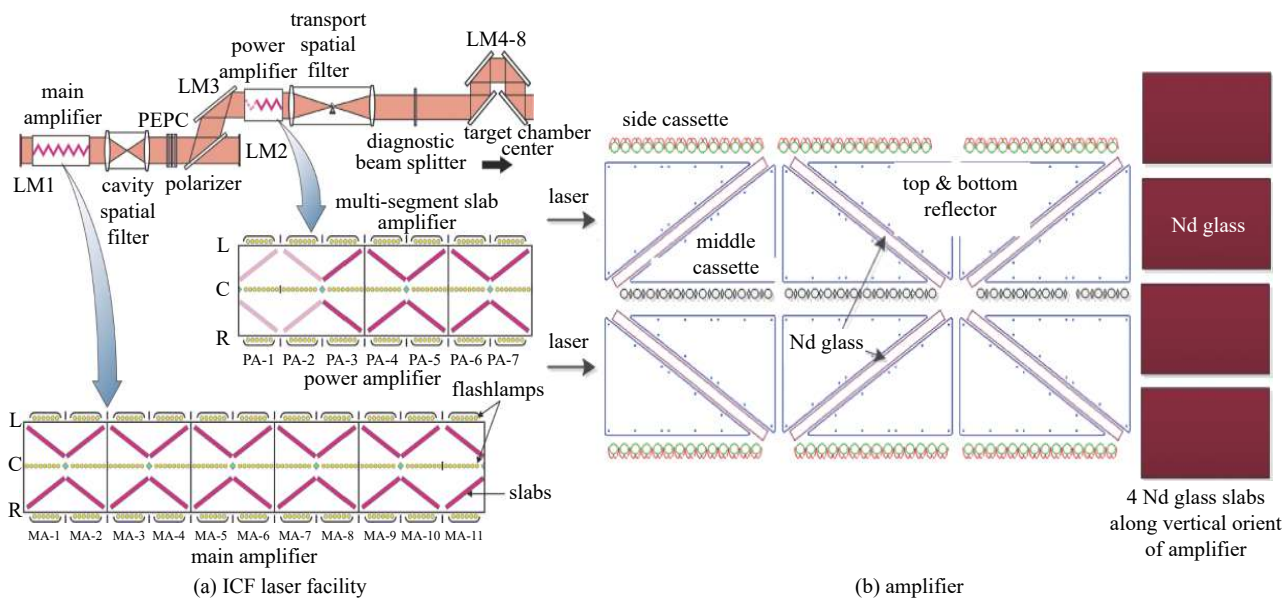


Fig. 1 Schematic of the ICF laser facility and the amplifier

图 1 ICF 激光装置及 400 mm 口径片状放大器示意图

大口径片状激光放大器增益储能能量传递转换的过程如图 2 所示,脉冲氙灯通过辐射发光将能库储能转换为钕玻璃片吸收带内泵浦能量,并通过放大器腔体反射器将泵浦光传输到钕玻璃片对其进行泵浦,钕玻璃片吸收泵浦能量后通过量子亏损、Stokes 效率转换、放大自发辐射(ASE)效应等过程最终转换为钕玻璃的上能级储能;部分泵浦能量则沉积于灯管、隔板玻璃、钕玻璃片内成为废热。

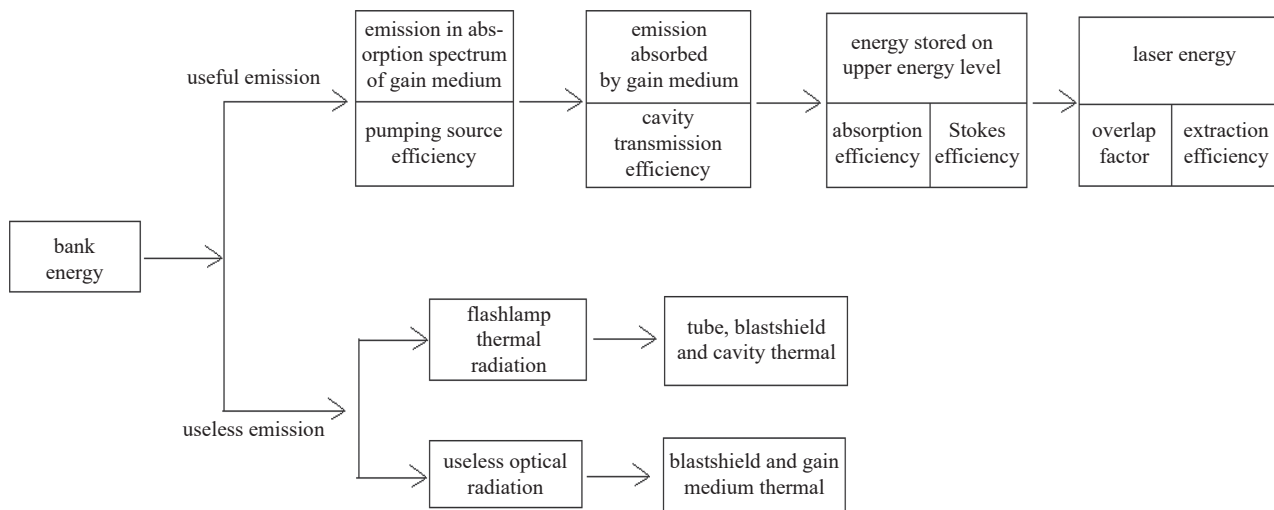


Fig. 2 The pass of energy of large aperture slab amplifier

图 2 大口径片状放大器增益储能能量传递转换过程

片状放大器增益退化的环节包括能库储能、氙灯电光转换、泵浦腔传输、钕玻璃吸收及上能级转换等四个方面。具体为能源组件电容值、氙灯电光转换效率、隔板玻璃透射率、侧灯箱渐开线聚光反射器的反射率、中灯箱菱形反射器的反射率、片箱顶部与底部聚光反射器的反射率、钕玻璃表面潮解及包边剩余反射率等。

初始能源储能 E_0 、电流密度特征参数 j 等如下

$$\begin{cases} E_0 = 0.5CV^2 = 12ld\sqrt{\tau}f_X \\ C^3 = 0.1\frac{E_0\tau^2}{K_0^4} \\ K_0 = 1.27\frac{l}{d}\left(\frac{p}{450}\right)^{0.2} \\ L = \frac{\tau^2}{9C} \\ j = 0.5\sqrt{\frac{2E_0}{L}}\left(\frac{d}{\pi}\right)^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: C 为回路电容值; V 为回路工作电压; l 为氙灯串联回路弧长; d 为氙灯内直径; τ 为泵浦放电脉宽; f_X 为氙灯爆炸系数; p 为氙灯气压; K_0 为氙灯特征值; L 为回路电感值。该环节造成增益退化的因素主要是电容器的电容值下降导致能源储能降低, 但由此氙灯串联回路的电流密度特征参数会下降带来氙灯辐射光谱中可被钕玻璃吸收的比例上升。

氙灯光电转换环节, 首先, 根据 MEH 理论^[6], 通过求解完整的电路方程组得到氙灯串联回路中的电流脉冲波形; 然后, 由 Trenholme-Emmett 理论^[7-8] 可求得氙灯辐射光谱的时间-功率分布, 如图 3 所示。但上述理论仅能针对理想情况下的氙灯放电开展计算, 随着脉冲氙灯运行发次的增加, 有以下问题: (1) 掺铈的氙灯管材透过率将逐渐降低; (2) 电极的阴极喷溅导致其电子逸出功增大, 光电转换效率降低; (3) 大口径氙灯慢漏气导致内部氙气纯度降低也会导致光电转换效率降低。以上问题会导致增益性能退化的因素, 目前尚无完整的理论模型进行描述。

在泵浦腔传输环节, 隔板玻璃透射率、侧灯箱渐开线聚光反射器的反射率、中灯箱菱形反射器的反射率、片箱顶部与底部聚光反射器的反射率等性能退化均会导致增益性能的下降, 但各部分对泵浦腔传输效率的影响权重存在差异。

钕玻璃上能级转换环节, 钕离子吸收谱有 5 个吸收峰, 其吸收谱如图 4 所示, 钕离子 $^4F_{3/2}$ 以上的能级为泵浦吸收带, 吸收氙灯光后将在几纳秒至几十纳秒内通过无辐射跃迁迅速弛豫到 $^4F_{3/2}$ 能级。钕玻璃泵浦效率如式(2)所示, 而激发态储能则要考虑斯托克斯损耗(以 $\lambda/1.053$ 来表示, 其中 λ 为泵浦光子波长)。

$$\eta_{Nd_abs} = \int_{0.4\mu m}^{1.0\mu m} \frac{\lambda}{1.053} \{D - \exp[\beta(\lambda)D]\} \frac{P_{Lamp_p}}{P_{Lamp_t}} d\lambda \quad (2)$$

式中: η_{Nd_abs} 为钕离子吸收效率, $\beta(\lambda)$ 是 Nd^{3+} 吸收谱, P_{lamp_p} 为钕离子泵浦吸收带内氙灯的光谱功率, P_{lamp_t} 为氙灯总辐射谱的光谱功率, D 是片厚度。

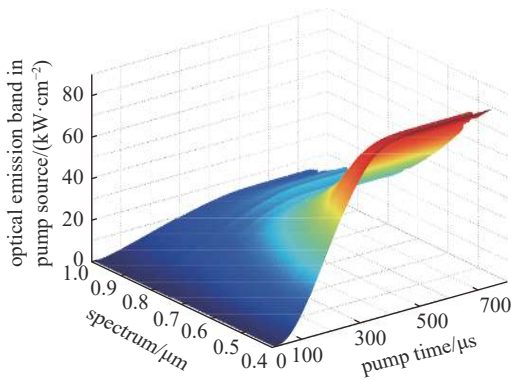


Fig. 3 Emission spectrum of flashlamp

图 3 时间和光谱分辨的氙灯辐射功率密度

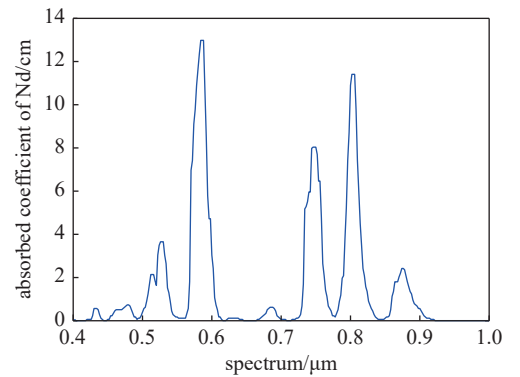


Fig. 4 Absorption coefficient of Nd

图 4 钕离子吸收系数(掺杂数密 $4.2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$)

泵浦功率对时间段 Δt 积分即可获得钕玻璃片内的初始储能密度 $E_{st}(x,y,z)$ 与初始小信号增益系数 $g_0(x,y,z)$, 即

$$E_{st}(x,y,z) = \int_t^{t+\Delta t} P_r(x,y,z,t) dt \quad (3)$$

$$g_0(x,y,z) = E_{st}(x,y,z) \frac{\sigma}{h\nu} \quad (4)$$

式中: P_r 为泵浦功率, σ 为激光材料辐射截面, h 为普朗克常数, ν 为激光频率。

钽玻璃激光介质在获得泵浦储能的同时又以荧光形式随机向 4π 空间辐射能量,在 t 时刻介质单元 ΔV 的初始储能密度为 $E_{st}(x,y,z,n)$,有一部分储能会以自发辐射(SE)荧光形式衰减掉, n 为差分法计算微分方程时的节点数。在 Δt 时间间隔内自发辐射(SE)能量密度为

$$E_{SE}(x,y,z,n) = \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) \right] E_{st}(x,y,z,t) \quad (5)$$

光线在经过另外的体积元时,自发辐射光被放大(ASE)并消耗初始储能,光线的能量

$$E_{ASE}(x,y,z,n+1) = E_{SE}(x,y,z,n+1) \exp[(g_{n+1}(x,y,z,n+1) - \alpha_{ns})d] \quad (6)$$

式中: α_{ns} 为损耗系数。

ASE 消耗初始储能后的储能密度为

$$E'_{st}(x,y,z,n+1) = E_{st}(x,y,z,n+1) - E_{ASE}(x,y,z,n+1) \quad (7)$$

该光线将在钽玻璃体内传输,历经钽玻璃片表面的反射与折射,直至被包边吸收。以上计算过程将遍历整个钽玻璃的空间网格。完成后再次经过 Δt 时间间隔,介质单元 ΔV 的储能密度 $E_{st}(x,y,z,n+1)$ 变为如式(8)的形式,泵浦光将带来储能密度的增加。

$$E_{st}(x,y,z,n+1) = (E_{st}(x,y,z,n) + \int_t^{t+\Delta t} P_t(x,y,z,t) dt) \exp(-\Delta t/\tau) \quad (8)$$

求解完所有的 $E_{st}(x,y,z,n)$ 之后,根据式(4)可得平均小信号增益系数。但在上述理论模型中,假定了钽玻璃包边可完全吸收放大自发辐射荧光。而在实际运行过程中,随着运行发次与时间的增加,会有部分荧光在包边玻璃与钽玻璃的界面反射再次进入钽玻璃,从而消耗上能级反转粒子数,降低增益性能,目前尚无完整的理论模型对此进行计算分析。

为此,基于以上基本理论,我们建立了一套 ICF 激光装置增益性能退化的归一化理论分析模型,以对各环节、各器件局部性能下降对增益性能 $g_{ability}$ 的影响开展预测,增量性能预测公式为

$$g_{ability} = E \left(1 - \frac{P_{ir} + P_{uv}}{P_{in}} \right) \{ \exp[-0.044 156 \times M_1(j,d,p)d] \} \times \\ [0.6 - (0.75P_{in} - 50) \times 0.002 5] \eta_0 \eta_1 (0.27\eta_2 + 0.24\eta_3 + 0.05\eta_4) \times \\ \left\langle 1 - \sum_{m=1}^k \frac{2m-1}{k^2} \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{2}{3}\tau\left(1 - \frac{m}{k}\right)\right] \right\} \exp\left(\frac{0.035L_1}{\eta_5}\right) \right\rangle \quad (9)$$

$$\begin{cases} P_{in} = 2.81 \exp[1.48 \times \ln(j) + 0.9 \times \ln(d) + 0.20 \times \ln(p) + 0.05 \times \ln(j) \ln(d)] \\ P_{ir} = 0.958 \exp[1.11 \times \ln(j) + 0.094 \times \ln^2(j) + 0.6 \times \ln(d) + 0.08 \times \ln(p)] \\ P_{uv} = 0.174 j^{2.07} d^{1.31} p^{0.2} \end{cases} \quad (10)$$

式中: E 是退化后的能源储能; $M_1(j,d,p)$ 为氙灯光谱辐射系数的定标函数, L_1 是随机光线在增益介质内自由传输的统计平均值; k 为将整个泵浦过程划分为若干时间步长的数量,在 50~70 之间; m 为第 m 个时间步长区间; η_0 是氙灯电光转换效率; η_1 是隔板玻璃对氙灯光谱透射效率; η_2 是侧灯箱聚光反射器对氙灯光谱反射效率; η_3 是中灯箱聚光反射器对氙灯光谱反射效率; η_4 是片箱聚光反射器对氙灯光谱反射效率; η_5 是包边玻璃吸收 1053 nm 荧光效率。根据各器件初始状态值以及运行一定发次后的值,利用该模型可完成增益退化的评估。

模拟计算电容器储能值下降与增益退化的关系如图 5 所示,当储能电容值下降至初始值的 95% 时,小信号增益系数为 0.437,相对于原始值 0.451 下降约 3.10%,对应实验值为 3.26%;当储能电容值下降至初始值的 90% 时小信号增益系数为 0.430,下降约 4.65%,对应实验值为 4.67%,理论与实验值有较好的符合性。

氙灯电光转换效率如式(11)所示, E_{in} 是进灯能量、 E_{flash} 是氙灯光能量,采用实验方式对 8 支氙灯进行了测试,

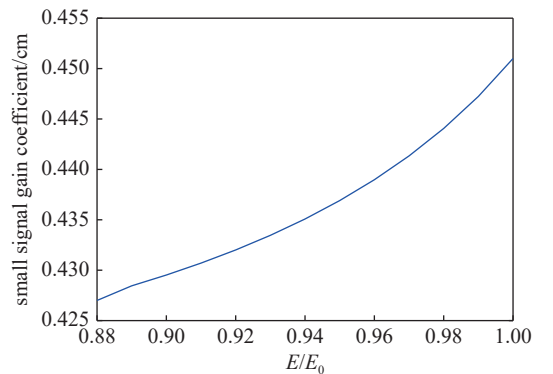


Fig. 5 Relationship of small signal gain coefficient and bank energy change

图 5 小信号增益系数与电容器储能值下降的关系

每两支灯组成一个回路,共四个回路,氙灯编号以及测试结果如表1所示,结果表明,经过3000发次运行,氙灯电光转换效率平均下降率约1.70%。

$$\eta_0 = E_{in}/E_{flash} \quad (11)$$

利用6组400 mm口径片状放大器开展实验研究,经过10年、3000发次运行后,能源电容值下降了1.5%、氙灯电光转换效率下降了约1.70%、隔板玻璃对氙灯光谱透射率下降了约3.6%、镀银聚光反射器下降了约20%(受到污染损伤的情况)、包边玻璃吸收1053 nm荧光的效率下降了约1%。根据式(9)所示的理论模型,增益能力将下降约6.3%。6组400 mm口径片状放大器的实验结果分别为7.1%、6.5%、5.8%、7.2%、6.2%、7.4%,平均值为6.7%,各组之间的差异主要在于聚光反射器受到污染导致性能退化的程度存在差异,实验值与理论预期整体相符。

2 防增益退化维护策略

影响增益性能的因素中,其性能稳定性依次为钨玻璃>电容器>脉冲氙灯>隔板玻璃>聚光反射器;同时单元器件的价值是防增益退化的依据之一,各器件的价值关系为钨玻璃>电容器>脉冲氙灯>隔板玻璃>聚光反射器,而损坏几率则为脉冲氙灯>聚光反射器>隔板玻璃>电容器>钨玻璃。为实现以最小的代价实现增益稳定,其维护策略应为:(1)钨玻璃和电容器以一年为周期、其余组件以半年为周期监测其主要性能参数,并利用式(9)所示的计算模型开展分析,预测装置增益性能的变化;(2)根据装置对增益的需求定期更换镀银聚光反射器和隔板玻璃、更换电容值下降超过10%的电容器、更换包边胶层异常长度超过5 mm的钨玻璃片;(3)保持工作电压不变,在能源组件中增加电容器,以加长泵浦脉冲、增加泵浦能量的方式实现增益的稳定。

根据以上策略,对6组400 mm口径片状放大器中的3组开展了维护,整体更换了镀银聚光反射器并将其反射率从90%提升至95%、隔板玻璃、电容值下降超过10%的电容器以及包边胶层异常长度超过5 mm的钨玻璃片,增益下降从维护前的7.1%、5.8%和6.2%提升至1.6%、1.2%和1.5%,平均1.43%,接近初始值,实现了片状放大器的增益稳定。

3 结论

规模化的ICF激光装置片状放大器造价高、单元器件多,准确预测单元器件局部性能下降对装置增益性能的退化影响并制定合理的维护策略对保障装置长期稳定运行尤为关键。本文中介绍了一套用于ICF激光装置片状放大器增益性能退化的归一化理论分析模型,基于该模型制定的维护策略,成功保障了400 mm口径片状放大器10年、3000发次运行后仍能整体满足装置要求,其计算结果与目前的实验结果有较好的符合性,但仍需更多的实验数据开展该模型的校核和优化,以用于大口径片状放大器的设计以及指导单元器件性能优化。

参考文献:

- [1] Kramer D. National Ignition Facility surpasses long-awaited fusion milestone [EB/OL]. (2022-12-13)[2022-12-13]. <https://pubs.aip.org/physicstoday/online/41898/National-Ignition-Facility-surpasses-long-awaited?searchresult=1>.
- [2] Besnard D. The Megajoule Laser—A high-energy-density physics facility [M]//Schwoerer H, Beites B, Magill J. Lasers and Nuclei. Berlin: Springer, 2006: 67-77.
- [3] 贺少勃, 陈远斌, 於海武, 等. 高功率激光放大器中的能量传输[J]. 中国激光, 2006, 33(S1): 276-279. (He Shaobo, Chen Yuanbin, Yu Haiwu, et al. Energy transmission in high power laser amplifier [J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(S1): 276-279)
- [4] 彭志涛, 景峰, 刘兰琴, 等. 片状放大器小信号噪声增益功率谱的理论计算[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(S1): 171-174. (Peng Zhitao, Jing Feng, Liu Lanqin, et al. Calculation of the power growth of small scale ripple for slab amplifiers [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2000, 12(S1): 171-174)
- [5] Hammon J, Fulkerson E S, Smith D L, et al. Predicted pulsed-power/flash-lamp performance of the NIF main amplifier [C]//Digest of Technical Papers. 12th IEEE International Pulsed Power Conference. 1999: 910-913.
- [6] Trenholme J H, Emmett J L. Xenon flashlamp model for performance prediction [M]//Hyzen W G, Chase W G. Proceedings of Ninth International Conference on High Speed Photograph. New York: Society of Motion Picture and Television Engineers, 1970: 299-302.
- [7] Markiewicz J P, Emmett J L. Design of flashlamp driving circuits [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1966, 2(11): 707-711.
- [8] Holzrichter J F, Emmett J L. Design and analysis of a high brightness axial flash lamp [J]. Applied Optics, 1969, 8(7): 1459-1465.