

文章编号: 0258-7025(2003)09-0769-06

单通激光片状放大器的模拟计算分析

贺少勃^{1,2}, 郑万国¹, 於海武¹, 王成程¹, 唐 军¹, 刘 勇¹, 淳于咏梅¹, 力一峰¹

(¹ 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; ² 国防科技大学理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 介绍了高功率固体激光驱动器中单通片状放大器(SSA)的模拟和实验研究结果。对放大器能量传输的各环节进行全系统模拟,在能源系统优化的前提下,对不同抽运条件和不同抽运腔构型放大器的增益特性进行实验研究,22 kV 工作电压下,获得了 $4.9\% \text{cm}^{-1}$ 的小信号增益系数和 2.43% 的储能效率。同时还分析了放大器的抽运热畸变及波前变化,实验测量了由抽运引起的腔内洁净度变化情况。

关键词 激光技术;单通片状放大器;小信号增益系数;热畸变;洁净度

中图分类号 TN 242 文献标识码 A

Research of Single Segment Laser Amplifier

HE Shao-bo^{1,2}, ZHENG Wan-guo¹, YU Hai-wu¹, WANG Cheng-cheng¹,
TANG Jun¹, LIU Yong¹, CHUNYU Yong-mei¹, LI Yi-zheng¹

¹Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang, Sichuan 621900, China

²College of Sciences, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract The Simulation and experimental results of single segment amplifier (SSA) used in high power laser system are introduced in this paper. By optimizing the pumping constructs of SSA, about $4.9\% \text{cm}^{-1}$ small signal gain efficiency and 2.4% storage energy efficiency have been obtained when working voltage is about 22 kV. At the same time, the thermal distortion and wavefront changing are investigated, the changing of cleanliness in pump cavity is measured.

Key words laser technique; single segment amplifier; small signal gain coefficient; thermal distortion; cleanliness

1 引 言

片状放大器是 ICF 激光驱动器最重要的单元器件之一,它不仅决定了整个驱动器主要的技术性能,而且影响着固体激光驱动器的整体造价。因此,研制高性价比的片状放大器是当今许多发达国家高功率激光研制项目中的重要课题。美国 LLNL 实验室及 Rochester 大学、法国 Limeil 和日本的 Osaka 实验室等都为提高片状放大器的储能效率和增益做了多年的研究工作,得到了许多重要的实验结果^[1],为设计高效的 ICF 驱动器提供了大量的实验数据和关键技术。

本文介绍了单通片状放大器(SSA)系统的研究

结果。通过数百发次的实验,对抽运参数进行全面优化和选择。对放大器的热效应和腔内洁净度进行了分析,建立了放大器的腔传输模型,得到较为全面的放大器的特征参数。

2 模拟分析及实验研究

SSA 的结构如图 1 所示。该装置为我国自行研制,采用方形通光口径(有效提高氙灯光利用率),增益介质为国产 N31 磷酸盐钽玻璃,单片尺寸为 $480 \text{ mm} \times 240 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$;采用可变数目和尺寸的氙灯,氙灯沿片长方向纵向排列,横向抽运;反射器形状可变(平板和圆柱型)。抽运腔结构要求尽量

收稿日期:2002-05-24;收到修改稿日期:2002-07-16

基金项目:国家 863 惯性约束聚变领域资助课题(课题号:416-2-1.3)。

作者简介:贺少勃(1974—),男,陕西商南人,硕士研究生,现主要从事高功率固体激光驱动器研究。E-mail:heshaoocn@yahoo.com.cn

紧凑,以提高腔传输效率,上下反射器底板可调。

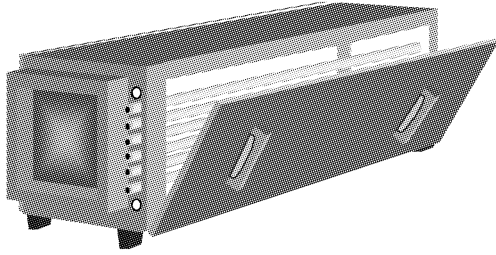


图 1 单通片状放大器示意图

Fig. 1 Schematic of the single-segment amplifier

2.1 抽运参数模拟设计

根据放大器不同层次的设计需求,开发了两级模拟软件,配合实验模拟平台上的研究工作和结构研究,对 SSA 进行系统设计^[2,3]。

2.1.1 第一级模拟

利用解析方法对放大器氙灯参数、钽玻璃片尺寸和能源系统放电参数等进行分析计算,通过软件模拟给出放大器主要的性能参数,如氙灯尺寸范围和能源系统工作初步参数等。氙灯能源参数主要包括几何参数和电参数:氙灯内径(d)、弧长(S)、供电网络电容(C)、电感(L)、充电电压(V)共 5 个独立变量。各变量必须满足以下边界条件。

1) 放电电路阻尼系数 α ^[4]

$$\alpha = K_0 / (V \sqrt{L/C})^{1/2} = k_1 S / d (V \sqrt{L/C})^{1/2} \quad (1)$$

式中, $K_0 = k_1 S / d$, S 是指每一放电回路中串联氙灯的总弧长,可表示为: $S = N \times S_0$, N 为串联灯数, S_0 是一灯的弧长。 k_1 是与氙灯充气气压有关的系数,一般情况下取为 1.28。 α 值决定了整个放电过程的状态:波形、脉宽、能量、进灯效率等。理论已证明,临界阻尼匹配是最佳工作条件。

2) 爆炸系数 f_x

$$f_x = \frac{1}{2} CV^2 / [BSd(t)^{1/2}] \quad (2)$$

其中分母为氙灯爆炸能量, t 为临界阻尼条件下的放电脉宽, B 为爆炸系数,不同实验室的测量结果稍有差别,在放大器设计中, f_x 取值约在 18%~25%之间。

3) 放电脉宽 T

在临界阻尼条件下, T 定义为氙灯电流波形的 90% 底宽

$$T = 3 \sqrt{LC} \quad (3)$$

放电脉宽大小关系到通过灯的电密度,从而影响

氙灯的光谱效率;另一方面,又影响抽运效率。两者对 T 的取值要求是相反的:抽运效率要求 T 越小越好,而 T 太小不仅限制了氙灯爆炸能量,而且使氙灯光谱效率下降。所以要仔细选择。一般 T 取 500 μ s 左右。

4) 能库利用率 η

$$\eta = \frac{1}{2} CV^2 / \frac{1}{2} CV_{\max}^2 = (V/V_{\max})^2 \quad (4)$$

对氙灯参数的 5 个变量,已有 4 个约束条件,可自由选择的余地不大,而且还有其它实用上的附加条件。所以,很难全面满足所有条件,只有根据实际情况,进行折衷,确保最重要的要求。

第一级模拟程序的计算结果:根据上述理论条件,设计了 SSA 基本的抽运放电和结构参数:氙灯充气气压为 26.66 kPa,内径分别为 $\phi 1.6$ cm, $\phi 2.4$ cm,弧长分别为 140 cm, 128 cm。两边各装 5~7 支,每两支串联为一组。其主要电参数为:储能电容值:96 μ F/组和 134 μ F/组,电感值:450 μ H/组和 185 μ H/组,最高工作电压:22 kV,总储能为 25.4 kJ/组,对应放电脉冲宽度 T 分别为:625 μ s 和 500 μ s。这样可以保证 $f_x < 20\%$,阻尼系数 α 在 0.65~0.85。通过多组可选参数,可以建立不同的实验条件,验证第一级模拟程序的正确与否。

2.1.2 第二级模拟

通过建模(包括物理模型和数学模型)详细模拟从能源系统放电网络到钽玻璃上能级储能的所有能量转换环节,给出放大器增益和储能效率;同时优化放电网络分布参数,优化氙灯尺寸和封装结构,优化放大器抽运腔形状,并对放大器结构设计提出具体指导。文献[5]对此进行了较为详细的论述,主要模拟模型包括:

1) 氙灯模型和放电网络模型

文献[6]对氙灯的非线性负载特性做了比较详细的研究。单节网络氙灯放电回路为

$$L \frac{di}{dt} \pm K_0 |i|^{1/2} + \frac{1}{C} \int_0^t i d\tau = V_0 \quad (5)$$

式中, $K_0 = k \cdot n \cdot l / d$, $k = 1.27 \times (P/450)^{0.2}$, 令 $Z_0 = \sqrt{L/C}$, $i = I \cdot V_0 / Z_0$, $\tau = t / T$, $T = \sqrt{LC}$, $\alpha = K_0 (V_0 Z_0)^{1/2}$ 。

考虑回路损耗电阻为 r 之后,(1) 式变为

$$\frac{dI_s}{d\tau} \pm \left(\alpha + |I_s|^{1/2} \cdot \frac{r}{Z_0} \right) \cdot |I_s|^{1/2} + \int_0^\tau I_s d\tau = 1 \quad (6)$$

利用(6)式,可以给出氙灯电流密度波形。由于

主回路参数是按照临界阻尼来设计的,因此电压小幅调整时,放电波形仍基本上处于临界阻尼状态,电传输效率大致相等,只是由于工作电压的提高(从 20 kV 到 23 kV),氙灯负载会提高 23.3%。H. T. Powell 等对氙灯进行详细研究之后得到一个经验模型,即氙灯的进灯电功率密度(kW/cm^2)由氙灯的电流密度($j\text{-kA}/\text{cm}^2$)、氙灯内径($d\text{-cm}$)、氙灯充气压力($p\text{-Pa}$)决定^[7]

$$P_{\text{in}} = 2.81 \exp[1.48 \ln(j) + 0.90 \ln(d) + 0.20 \ln(p) + 0.050 \ln(j) \ln(d)] \quad (7)$$

氙灯辐射输出由三部分组成:可见光吸收区、紫外区、红外区。总辐射功率为三者之和,其中我们所关心的抽运带为 5 个主要的钕离子吸收带。随着进灯功率的增加,氙灯光谱输出明显蓝移。氙灯的电光转换效率(辐射效率)为总的辐射输出光功率与进灯功率之比, $\eta_{\text{EO}} = P_{\text{out}}/P_{\text{in}}$ 。随着进灯电功率的提高或氙灯负载的提高,有效输出的抽运带份额逐渐下降,氙灯有效光谱效率就会降低。

目前的激光驱动器均采用 LC 供电网络和引燃管内触发系统进行工作,同时为提高效率和加强氙灯工作的稳定性和可靠性,提高光效,还采用了预电离电路,即在主脉冲放电之前 150~250 μs 加预电离脉冲,它可以在主脉冲放电中保护电感或电阻,首

先在氙灯中打开一放电通道,使得主放电脉冲电流波形前沿变陡(氙灯不存在放电延迟),放电更加均匀,有利于提高氙灯电光转换效率。

2) 抽运腔光传输模型

为了使氙灯发出的有效能量尽量传输到钕玻璃片,即尽可能提高腔传输效率,就可以利用光线追迹方法进行计算,同时要考虑改善抽运腔结构,使抽运光在钕玻璃表面分布均匀。

3) 抽运的动力学模型

在氙灯抽运钕玻璃的过程中,存在两个相互竞争的过程:一方面是钕离子吸收抽运能量使得上能级反转粒子数增加,另一方面自发辐射使得反转粒子数减少。而由于吸收光子和激光上能级间的量子亏损,通过吸收氙灯光而抽运到高能态上的粒子并不能全部转换到亚稳态上,其中一部分通过向一、二能级的跃迁损失掉,这一过程的效率称量子效率;另外,亚稳态上的电子的能量比四能级上一个电子的能量要小,这种损耗叫斯托克斯损失。可以由速率方程对放大器的抽运动力学过程进行研究^[2]。在已知腔传输效率的情况下,由速率方程确定 SSA 的增益特性。

表 1 给出了第二级模拟计算结果。

表 1 两种抽运条件下的模拟计算结果

Table 1 Simulate results in two different pumping conditions

Pump condition $L/\mu\text{H}, C/\mu\text{F}$	Width of pulse/ μs	Xe spectrum efficiency in absorption bands	Xe transmission efficiency	Relative efficiency of Nd^{3+} ion	Relative pump energy density	Total relative Nd^{3+} ion
$L = 450, C = 94$	617	21.0%	57.4%	100%	100%	100%
$L = 200, C = 135$	493	21.14%	58.8%	111.0%	101.2%	121.6%

在对上述模型进行仔细分析的前提下,结合现有技术条件,建立了一套完整的单通片状放大器系统,并在该平台上进行了大量的实验研究工作。

2.2 增益及储能效率实验研究

2.2.1 氙灯电能传输效率

实验中首先测量了放电网络的电能传输效率。分别采用了 $\phi 1.7\text{ cm}$ 和 $\phi 2.4\text{ cm}$ 的氙灯,定义氙灯实际获得的能量 E_0 与电容器储能 E 的比值为电能传输效率。实验结果表明:20 kV 时, $\phi 2.4\text{ cm}$ 氙灯的电能传输效率为 68.2%,电路损耗为 31.8%,对 $\phi 1.7\text{ cm}$ 内径氙灯:电能传输效率为 70.2%,电路损耗为 29.8%。另外还对不同器件的损耗情况分

别进行了测量,20 kV 时,引燃管的损耗为 10.7%,传输电缆的损耗为 9.1%。由于电压不同氙灯的内阻也不同,测得随着电压的升高,放大器的电能损耗呈逐渐上升的趋势。

2.2.2 影响放大器小信号增益和储能效率的因素

在保持反射器形状为平板反射器的条件下,用 6 组粗细氙灯抽运,获得的实验数据见表 2^[8]。

处理表内数据时考虑到钕玻璃动态吸收损耗为 0.45%/cm,储能效率分为两种情况,即扣除电路损耗和不扣除电路损耗两种。由表 2 可知,相同抽运能量密度下,粗细氙灯对放大器的小信号增益和储能效率影响不大;同时在相同爆炸系数工作前提下,

氙灯内径越大则放大器的小信号增益系数越高。

表 3 是 SSA 部分实验和模拟结果的比较,可以看出,通过第一级模拟程序,确定了放大器的基本的结构参数和抽运条件,再通过第二级模拟程序计算出了 SSA 增益特性。结果表明,该模拟程序的计算结果与实验结果符合得较好。其中增益系数比模拟值要低,原因是模拟程序中没有考虑放大器正常运

行时的端面漏光效应,同时腔传输模型没有考虑复杂的腔内损耗。

实验中还发现,改善侧反射器形状对增益和储能效率会产生较大影响,主要是因为会提高腔传输效率。还分析了预电离电路对放大器增益系数的影响,实验虽然观察到预电离使得氙灯导通延时变短(约 14 μs),但对放大器增益能力的影响并不明显。

表 2 不同充电电压和氙灯直径下的小信号增益系数和储能效率

Table 2 Small signal gain coefficient and storage energy efficiency in different charge voltage and diameter of Xe flashlamp

Charge voltage/kV		18	19	20	21	22
Small signal gain	ϕ 1.7 cm	0.039	0.041	0.044	0.046	0.049
Coefficient/ cm^{-1}	ϕ 2.4 cm	0.039	0.043	0.045	0.046	0.048
Storage efficiency	ϕ 1.7 cm	1.98	1.87	1.81	1.72	1.67
		3.01	2.85	2.63	2.43	2.43

表 3 SSA 增益特性的实验和模拟结果比较

Table 3 Comparison of experimental results and simulated results of SSA

Contents of research	Experimental results	Simulated results
Storage efficiency	2.43%	2.62%
Small signal gain coefficient	5.79%	4.90%
Storage efficiency (The interval between soleplates (udder and above) and Nd:glass changed from 6 cm to 1 cm)	Improved about 14.2%	Improved about 14.8%
Small signal gain coefficient (Discharge pulse width changed from 600 μs to 500 μs)	Improved about 24.4%	—

2.3 热效应研究

利用哈特曼波前传感器对 3 片长的 SSA 进行了热恢复实验研究。哈特曼波前传感器为连续工作方式,数据采集速率 25 帧/s,工作波长 0.6328 μm ,微透镜阵列数为 17×17 ,输出口径 ϕ 60 mm,经扩束变为 ϕ 200 mm 后与 SSA 相连。

SSA 在放电之后,氙灯抽运能量的绝大部分以热能的形式沉积在放大器各个部件上,特别是氙灯壁、隔板玻璃和钨玻璃片等;由于抽运腔的结构特性以及片内放大自发辐射(ASE)加热钨玻璃片边缘包边的缘故,钨玻璃片内的初始温度分布是不均匀的;因此,氙灯放电结束后,氙灯、隔板玻璃、钨玻璃片以及放大器腔内的其他部件之间通过对流、辐射和热传导等过程进行热量交换,建立热平衡态。给出了在 SSA 实验平台上利用哈特曼波前传感器进行的热恢复实验研究结果,并与片状放大器全三维热-弹性-光学波前畸变模型的计算结果进行了校核。

图 2 给出了 SSA 热畸变恢复的波前均方根梯度值(RMS)的理论模拟和实验值随时间的变化过程,二者符合得很好。图中后半段的 RMS 值略有

起伏主要是实验环境的影响。在氙灯抽运结束后的初始时刻至热恢复 40 min 左右的时间内,钨玻璃片包边向片框缓慢散热,但由于钨玻璃片包边与片抽运区域之间较大的温差,使得钨玻璃片内发生的主要是自平衡过程;同时,由于氙灯的初始温度较高,它要向隔板玻璃辐射热量,再由隔板玻璃向钨玻璃片辐射传热,这一过程一方面使钨玻璃片的整体平均温度升高,另一方面也加速了钨玻璃片内部自平衡过程。因此,在前 40 min 内,由钨玻璃片内热梯度引起的波前畸变迅速地恢复;在此后的时间内,整个放大器内部各部件之间的温差较小,与周围环境之间缓慢的热交换过程使得热畸变恢复的速度明显降低^[9]。

计算表明,波前热畸变主要由钨玻璃片的热变形以及折射率温度效应引起(热应力对波前的影响远小于前两者,因此片内温度越高的地方,波前越滞后)。通过对放大器热效应机理的研究,有利于建立正确的主动冷却的方法,从而大大提高放大器装置的运行效率和质量。

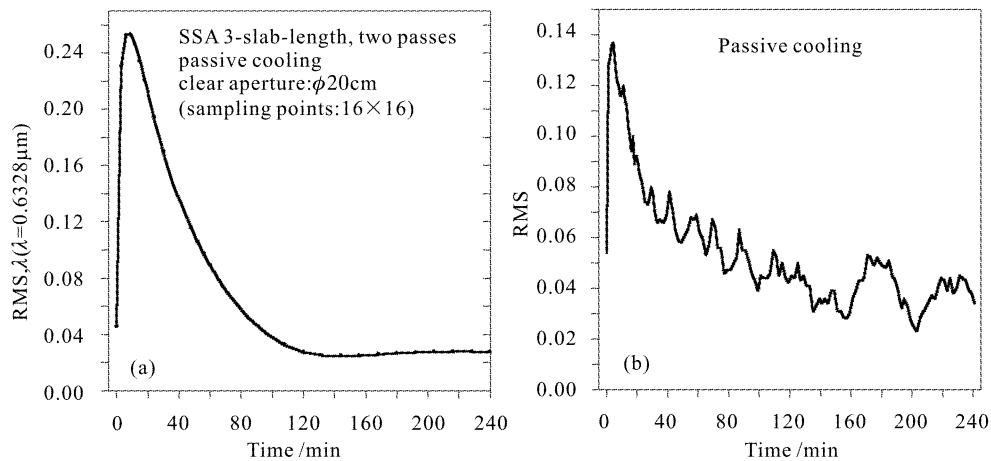


图 2 SSA 光束波前畸变的恢复过程

(a) 模拟值; (b) 实验值

Fig. 2 Thermal recovery of SSA wavefront distortion

(a) simulate value; (b) experimental value

2.4 腔内洁净度研究

NIF 的研究表明,当增益介质表面存在污染粒子时,氙灯辐照是引起片损坏的主要原因。因为高强度的氙灯辐照能够熔化和分解污染物粒子,从而在片表面形成局部区域的热梯度并降低激光介质的抗热冲击性能,它们的共同作用导致了片表面的破裂。研究高功率放大器片腔洁净度以及如何消除放大器每次工作之后形成的气溶胶,对激光装置的运行维护以及延长激光增益介质的寿命至关重要。

2.4.1 实验装置

SSA 片腔由隔板玻璃、端部窗口玻璃以及放大器上下底板构件组成,有效片腔容积约为 $180\text{ cm} \times 32\text{ cm} \times 35\text{ cm}$ 。超纯氮气气路由放大器顶部引入,氮气瓶至放大器入口的管道长度为 2.5 m ,管道内径 8 mm ;排气口在放大器底部,排气口至粒子计数器的入口约为 1.5 m ,管道内径 $\sim 6\text{ mm}$ 。通过测量放大器片腔内悬浮粒子浓度来给出片腔的洁净度,粒子数的计量采用了 Y09-4 型尘埃粒子计数器。

2.4.2 实验结果

测量了 SSA 氙灯放电之后粒子数自然沉降 2 h 和 7 h 过程中气溶胶粒子数浓度的变化情况^[10]。放大器氙灯放电之后 (22 kV),片腔内基本上达到了 100 万级气溶胶的水平 (在 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 粒径水平上),但粒径基本上 $< 2\text{ }\mu\text{m}$ 。由氙灯抽运辐照直接产生的大粒径 ($> 2\text{ }\mu\text{m}$) 粒子数不多。小粒径粒子 ($< 2\text{ }\mu\text{m}$) 的自然沉降或消散速率明显地慢于大粒径微粒。

鉴于气溶胶的自然消散过程较慢,因此重点研究了在氙灯放电结束之后利用大气流量的超纯 N_2 气冲洗片腔的情形。放大器氙灯抽运之后气溶胶粒子数的变化呈现出很强的规律性,具体表现为:

1) 不使用 N_2 气冲洗片腔时,氙灯工作 n 发时,气溶胶粒子数浓度基本上呈线性增长,即 $N_{\text{Particle}} \sim k_0 \cdot n$,其中 k_0 为常数;

2) N_2 气冲洗量越大,越有利于放大器片腔洁净度的恢复,符合稀释规律;

3) 腔内气溶胶是由于氙灯放电时强光辐照例行产生的,并不因为每次冲洗片腔而逐渐减少。

从研究结果来看,气溶胶主要来源于放大器片腔内部的有机材料诸如密封垫和密封圈的热解作用,因此在设计放大器的过程中应特别注意选用耐强光辐照的腔内材料,或者对这些材料的表面进行保护,以使它们不直接暴露于高强度氙灯和激光辐照之下。另外,用于吸收 ASE 的钨玻璃片边缘包边在经过几十至几百发氙灯辐照之后容易脱落,这一现象表明,包边与主片之间的粘接材料也是产生气溶胶的一个主要来源,需要很好的设计。

3 结 论

根据放大器的能量传输特性,建立了一整套放大器理论模型,开发了两级优化模拟设计软件;由此对 SSA 结构和抽运参数进行了优化,并与实验结果进行了校核,很好地说明了实验的规律和结果。对激光驱动器能源系统的能量传输性能和放电参数进

行了全面系统的实验研究,详细地研究了影响放大器能量转换的各种因素,得到这些因素对放大器能量转换贡献程度的重要数据,在 22 kV 工作电压下,获得了 $4.9\% \text{cm}^{-1}$ 的小信号增益系数和 2.43% 的储能效率。同时还对片状放大器的热效应及热恢复进行了理论模拟和实验研究工作,取得了很好的实验结果。另外,在 SSA 的研究平台上对抽运引起的放大器洁净度变化进行了初步分析。

致谢 本实验的研究工作得到了张小民、周丕璋研究员,以及唐灿女士的大力支持和协助,在此表示诚挚的感谢。

参 考 文 献

- 1 H. T. Powell, A. C. Erlandson, K. S. Jancaitis. Characterization of high power flashlamp and application to Nd:glass laser pumping [C]. *SPIE*, 1986, **609**:78~93
- 2 Zhang Hua, Gao Yanxia, Fan Dianyuan. Optimized design of xenon flashlamp pumping of Nd: glass amplifier [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(12):1616~1623 (in Chinese)
- 3 Zheng Wanguo. Research for energy transfer process of high power laser disk amplifier [D]. The Chinese Academy of Sciences, Master Degree Dissertation, 2001. 17~26
- 4 W. Koechner. Solid-state Laser Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002. 305~306 (in Chinese)
- 5 David C. Brown, High-peak-power Nd: glass Laser System [M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1981. 99~126
- 6 J. P. Markiewicz, J. L. Emmett. Design of flashlamp driving circuits [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1966, **QE-2**(11):707~711
- 7 H. T. Powell, A. C. Erlandson, K. S. Jancaitis *et al.*. Flashlamp pumping of Nd: glass disk amplifiers [C]. *SPIE*, 1990, **1277**:103~120
- 8 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* (强激光与粒子束), 2000, **12**(2): 155~158 (in Chinese)
- 9 Haiwu Yu, Wanguo Zheng, Chengcheng Wang *et al.*. Thermal-recovery optimization of SG-III prototype [J]. *Opt. Eng.*, 2001, **40**(1):126~131
- 10 Yu Haiwu, Zheng Wanguo, Tang Jun *et al.*. Investigation of slab cavity cleanliness of high power laser amplifier [J]. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 2001, **13**(3):272~275 (in Chinese)

本刊增页及更改出版日期启事

近年来,由于来稿量较多,而本刊的容量又有限,为了缩短论文的发表周期,故从 2004 年第 1 期起,经上级有关部门批准,本刊将从原来的 96 面增至 112 面,出版日期从每月 20 日提前为每月 10 日。特此通知。

《中国激光》编辑部

2003 年 9 月