

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0522-04

放大器电抽运参量对氙灯光效影响的研究

陈远斌, 於海武, 贺少勃, 郭良福, 杨东, 刘勇, 黄征, 力一峥, 陈德怀

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 研究了电抽运参量对大尺寸脉冲氙灯光效的影响,包括预电离点灯以及抽运脉宽两方面内容。研究结果表明:预电离技术可以使氙灯光效增加约7.8%;而抽运脉宽变窄50 μs时,有效光输出能量却增加了2.0%。

关键词 激光技术; 氙灯; 光效; 预电离; 抽运脉宽

中图分类号 TN245

文献标识码 A

Study on the Effect of the Electric Pumping Parameter on the Optical Efficiency of Flashlamp in Amplifier

CHEN Yuan-bin, YU Hai-wu, HE Shao-bo, GUO Liang-fu, YANG Dong, LIU Yong, HUANG Zheng, LI Yi-zheng, CHEN De-huai

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

Abstract The effect of the electric pumping parameters on the large dimension flashlamp was studied which includes the effect of preionization and pulsh length. The result indicates that the preionization technology will increase optical efficiency about 7.8%, and the efficiency will increase about 2.0% with the pump duration shorten 50 μs.

Key words laser technique; flashlamp; optical efficiency; preionization; pumping pulsh length

氙灯的预电离检验技术已应用得较早^[1],但是将预电离作为提高氙灯光效的有效途径并应用于大型激光装置,只是从美国的 Beamlet 激光装置和 AMPLAB 放大器才开始。国内的预电离研究以往主要用于氙灯检验,目前,我们已成功地将预电离技术应用用于4×2×3组合式片状放大器,除传统的氙灯检验功能外,更重要的是用于提高氙灯光效^[2]。

1 氙灯电学特性

J. L. Emmett 等对较高充气压力的小尺寸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(LCR回路):

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

其中 $K_0 = knl/d$, $k = 1.27 \times (P/450)^{0.2}$ 它是表征氙灯电负载特性的一个参量。

令 $Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$, $i = \frac{IV_0}{Z_0}$, $\tau = \frac{t}{T}$, $T = \sqrt{LC}$, $\alpha = \frac{K_0}{(V_0 Z_0)^{1/2}}$ 。变量代换后,(1)式变为:

$$\frac{dI}{d\tau} \pm \alpha |I|^{1/2} + \int_0^\tau I d\tau = 1 \quad (2)$$

考虑回路损耗电阻为 r 之后,(2)式变为:

$$\frac{dI_s}{d\tau} \pm \left(\alpha + |I_s|^{1/2} \frac{r}{Z_0} \right) |I_s|^{1/2} + \int_0^\tau I_s d\tau = 1 \quad (3)$$

氙灯电流波形为 $i(t)$, 电流密度波形为:

$$j(t) = i(t) / \pi R^2 \quad (4)$$

式中 R 为氙灯内半径。

氙灯进灯功率为:

$$P_{in} = V \cdot i = \pm K_0 |i|^{3/2} \quad (5)$$

式中符号与 i 的符号一致。每回路氙灯两端的电压为:

$$V = \pm K_0 |i|^{1/2} \quad (6)$$

图1给出了大尺寸脉冲氙灯在充气压力较低条件下,根据上述模型求解的氙灯放电电流曲线以及利用罗斯科夫大电流线圈实测的氙灯电流放电曲线比较。可以看出,没有预电离时,氙灯初始时刻的绝缘高阻状态(氙的完全原子态)使得氙灯导通有延时现象(气体雪崩击穿放电规律)。由于充气压力较

基金项目: 国家863计划惯性约束聚变领域重点资助项目。

作者简介: 陈远斌(1973-),男,中国工程物理研究院激光聚变研究中心助理研究员,主要从事高功率固体激光技术研究。

E-mail: cyblqh@163.com

低(~26.6 kPa),并且灯内径较大($\phi 32$ mm),因此其气体放电规律与小灯($<\phi 32$ mm, >60 kPa)有不同放电现象,大灯的放电有明显的导通延时现象。为此,我们采用了脉冲预电离点灯技术,使得在主放电到来之前,灯内的氙气处于部分电离状态,一方面提高氙灯的触发一致性,另一方面减小主放电对氙灯的冲击。图2给出了在相同配电参量条件下,有无预电离对应的氙灯放电电流曲线。与图1比较可以发现,理论模拟更适合于有预电离的状态,即氙原子处于部分电离化态,灯处于有限电阻状态,适合于LCR放电模拟。

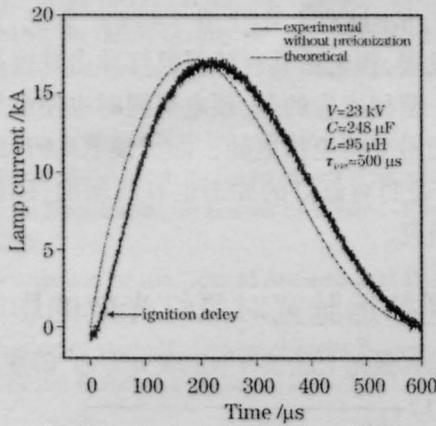


图1 无预电离时氙灯电流波形的理论与实验对比

Fig.1 Current waveform comparison between theory and experiment

图3给出了图2的前50 μs的放电电流细节,可以看出,加预电离时,氙灯导通延时消失,并且有预电离时,氙灯电流波形前沿变得更陡,使得有效光辐射输出效率更高。

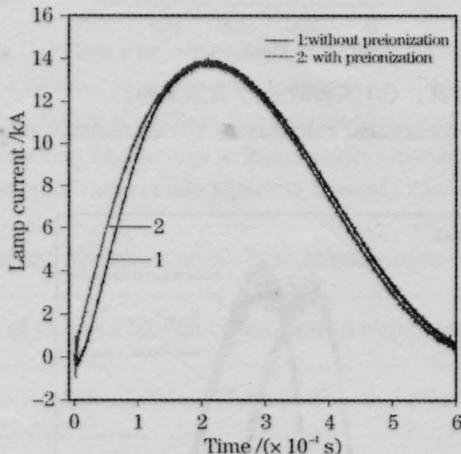


图2 有无预电离对应的氙灯电流曲线

Fig.2 Current waveform with and without preionization

2 氙灯电光转换特性

氙灯辐射输出由三部分组成:抽运带、紫外区、

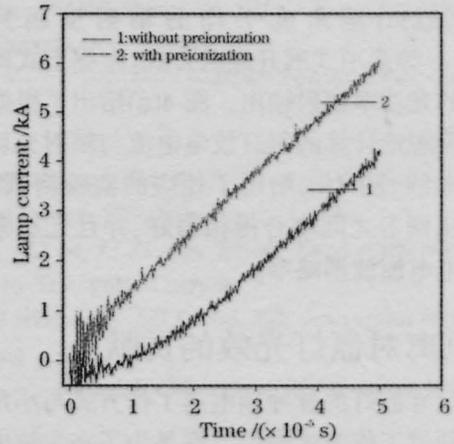


图3 氙灯放电电流初始波形(有无预电离的比较)

Fig.3 Initial flash-lamp current waveform (comparison of with and without preionization)

红外区,总辐射功率为三者之和:

$$P_{out} = P_{ir} + P_{pump} + P_{uv} \quad (7)$$

其中

$$P_{ir} = 0.985 \exp[1.11 \ln(j) + 0.094 \ln^2(j) + 0.6 \ln(d) + 0.080 \ln(p)]$$

$$P_{uv} = 0.174 j^{2.07} d^{1.31} p^{0.2}$$

$$P_{pump} = \int_{0.4}^{1.0} I(\lambda) d\lambda$$

氙灯在抽运带内的吸收/辐射系数可看作由连续谱状 $a_c(\lambda)$ 和线谱状 $a_l(\lambda)$ 两部分组成,表示为:

$$\alpha(\lambda) = [a_c(\lambda) + a_l(\lambda)] M(j, d, p) \quad (8)$$

$\alpha(\lambda)$ 与进灯电功率(灯电流密度)有关,它决定了氙灯等离子体的不透明度,也就决定了氙灯等离子体的吸收和再发射问题。 $M(j, d, p)$ 为定标函数:

$$M(j, d, p) = \exp[1.57 \ln(j) + 0.071 \ln^2(j) + 0.19 \ln(d) + 0.46 \ln(p)] \quad (9)$$

并且 $a_c(\lambda)$ 可表示为

$$a_c = 0.0237 \exp\{-[(\lambda - 0.700)/0.330]^2\} + 0.0015 \exp\{-[(\lambda - 0.300)/0.140]^2\} \quad (10)$$

线谱 a_l 由 20 条独立的 Lorentzian 线组成。

等离子体温度 T 由经验公式给出:

$$T = 9300 j^{0.18} d^{0.002} p^{-0.017} \quad (11)$$

由 Kirkhoff's 法则可知对温度为 T , 观察方向线度为 l 的等离子体的辐射强度为:

$$I(\lambda) = [1 - \exp[-\alpha(\lambda)l]] I_{BB}(T, \lambda) \quad (12)$$

其中, $I_{BB}(T, \lambda)$ 为普朗克函数,该表达式对观测角平均后即给出了氙灯的光谱辐射强度(抽运带内的光谱辐射输出功率(kW/cm²·μm))

$$I(\lambda) = I_{BB}(\lambda, T) F[\alpha(\lambda)d] \quad (13)$$

其中 $F[\alpha(\lambda)d]$ 是角度平均的辐射度函数, 为 Treholme 等多项式展开经验公式。根据上式即可求出氙灯的光功率辐射输出。图 4(a)给出了根据上述经验模型理论计算的氙灯放电电流与辐射光功率的归一化曲线, 图 4(b)给出了相应的实验测试波形, 可以看出两者之间吻合得相当好, 并且光功率波形要比放电电流波形略窄。

3 预电离对氙灯光效的贡献

大尺寸氙灯的脉冲预电离工作方式与小尺寸氙灯直流预燃工作方式类似, 都是为了在主放电之前提供适量的自由电子、离子及亚稳原子(即使氙气处于部分电离化状态), 从而使: 1)主放电能量用于增加气体内部能形成放电通道而消耗的能量减少, 以达到提高氙灯辐射效率的目的; 2)主放电更容易形成均匀膨胀的氙等离子体, 以达到减小对氙灯冲击的目的。

利用 4x2 片状放大器系统, 实验测试了预电离对氙灯光效的影响。有无预电离条件下各测量 4 发, 测试设备为光电二极管。图 5 给出了 4 发次中最保守的一组辐射光功率波形比较(即相差最小)。图 5(a)给

出了完整的光功率波形, 可以看出含预电离时, 光效要高出 8.96%。但应该注意到, 预电离自身含有一定的能量(如图所示, 主放电之前有一个小的包络), 由于激光增益介质上能级寿命较短的原因, 这一小部分能量对激光上能级储能没有丝毫贡献, 因此仅比较主发光波形发现, 平均值加预电离时, 氙灯光效约增加 7.8%(4 发次的平均值), 如图 5(b)所示。

从发光波形上可以看出, 预电离的作用主要表现为波形前沿上升得更快, 从而使有效光能量前移, 有利于增益介质的上能级储能。另外, 在实验中发现, 加预电离时, 峰值电流略有下降(下降 2.84%), 而峰值光功率略有上升(上升 1.43%)。因此, 直观比较可以发现, 预电离具有减缓氙灯冲击并提高光效的目的。值得注意的是, 预电离同时也使氙灯放电电流的前沿变得更快更陡, 即加预电离时 di/dt 略大, 是否表明对氙灯的冲击也有所增加, 还值得进一步的研究。

4 不同抽运脉宽对氙灯光效的影响

考虑到激光上能级有限的荧光寿命, 磷酸盐钨玻

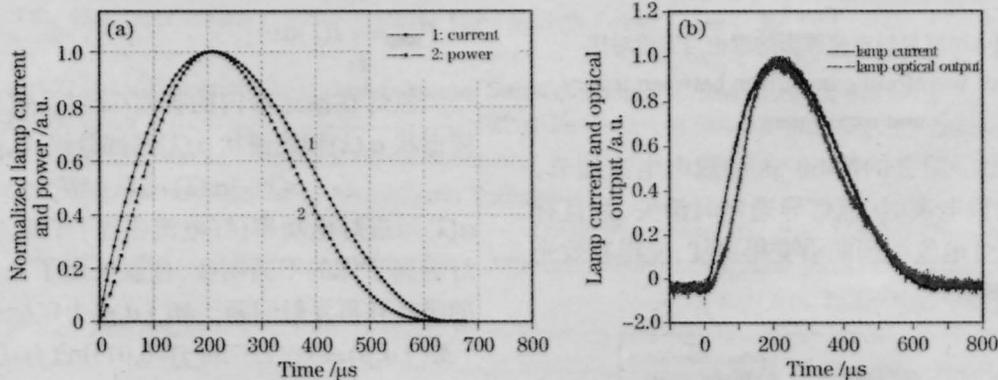


图 4 归一化的氙灯放电电流与光辐射功率。(a) 理论计算; (b) 实验测量(不含预电离)

Fig.4 Unitary flash-lamp current and optical ray radiation power. (a) theoretical calculation; (b) experiment measure (without preionization)

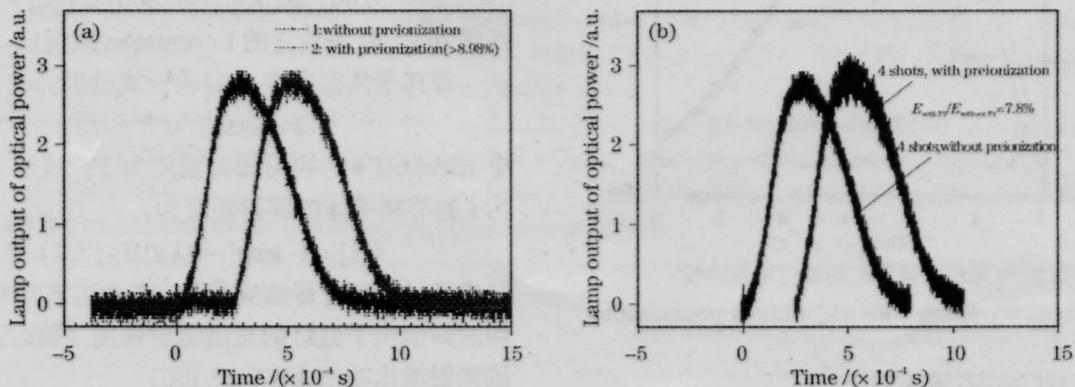


图 5 (a) 氙灯输出光功率波形; (b) 预电离的实际贡献为 7.8%(平均值)

Fig.5 (a) Output power waveform; (b) Preionization increase output power about 7.8%

璃材料的荧光寿命通常为数百微秒。根据速率方程 $dE/dt = P(t) - E/\tau$, E 为激光上能级的储能, P 为抽运功率, τ 为上能级寿命, 包括由自发辐射(荧光寿命)、放大自发辐射(ASE)、多声子跃迁等综合过程形成的上能级寿命, 因此抽运脉宽与上能级储能直接相关。

图 6(a)给出了电容器储能相等时, 不同抽运脉

宽时氙灯放电电流曲线。图 6(b)是与之对应的氙灯光辐射波形。可以看出, 抽运脉宽变窄时, 氙灯峰电流更高, 导致: 1) 灯的电阻非线性特性使电路传输效率下降; 2) 氙灯等离子体不透明度增加使氙灯总的光功率(能量)输出下降, 脉宽缩短 50 μs 时, 氙灯总的光输出下降了 1.63%。

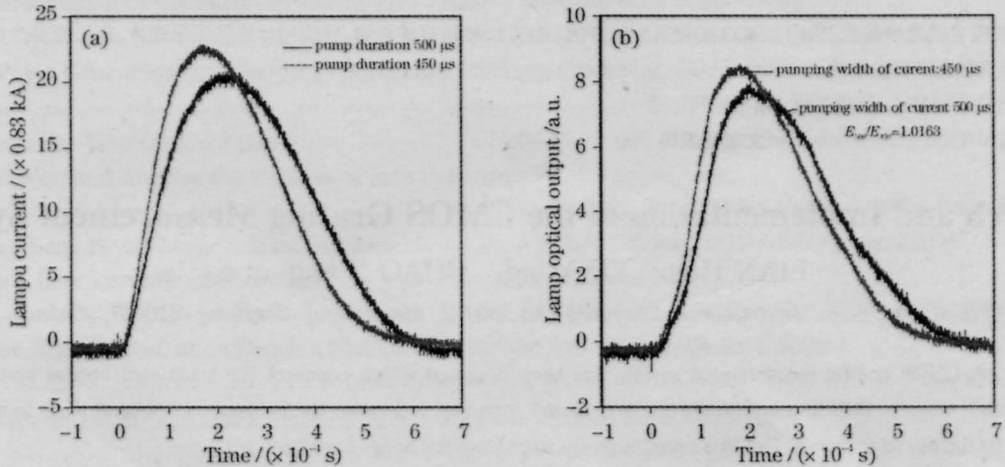


图 6 不同抽运脉宽的氙灯放电电流波形(a)和图 7 不同抽运脉宽的氙灯光辐射输出(b)

Fig.6 Current waveform (a) and optical output (b) with different pulse length

图 7 给出了抽运脉宽与上能级储能之间的时序关系。其中抽运脉宽分别为 500 μs 和 450 μs , 增益介质的荧光寿命为 320 μs , 描述 ASE 的特征参量增益长度积 $\beta \times L \sim 3.3$ 。因此, 虽然抽运脉宽缩短时, 总的光输出能量下降, 但是对于感兴趣的有效光输出能量却增加了 2.0%, 如图 8 所示。值得注意的是, 氙灯工作电流更高时, 灯辐射光谱蓝移, 使钨离子光谱吸收效率下降。因此, 综合所有因素计算表明, 脉宽从 500 μs 降到 450 μs 时, 小信号增益系数增加了 0.4%, 效果并不明显。因此考虑到氙灯工作可靠性问题, 放电脉宽不宜设计得太窄。反之, 抽运脉宽也不

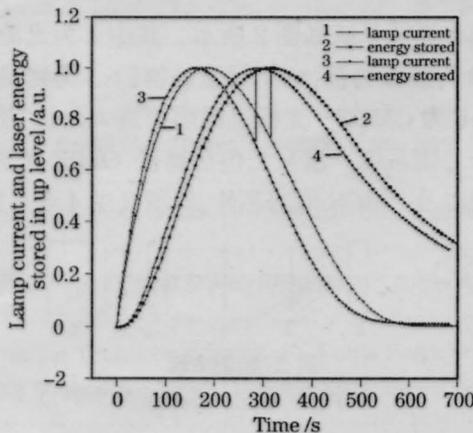


图 7 氙灯电流与激光上能级储能之间的延时关系

Fig.7 Time-delay between current and energy stored in laser upper energy level

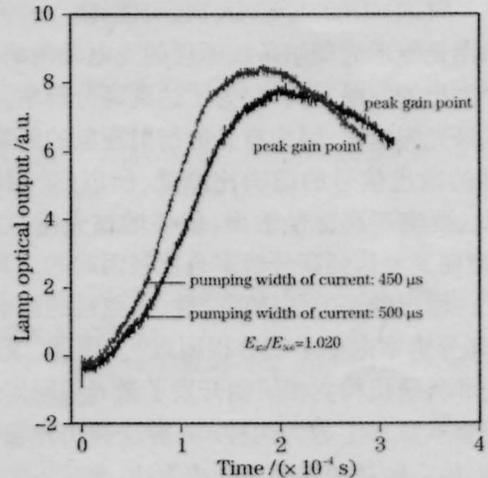


图 8 峰值增益时刻之前的氙灯光辐射输出

Fig.8 Optical output before peak gain point

宜设计得太宽, 计算表明, 当抽运脉宽从 450 μs 放宽到 600 μs 时, 增益会下降 2.73%。

参考文献

- 1 D. Larson. Beamlet pulse-power system[R]. UCRL-LR-105821-95-1: 62-67
- 2 Li Yizheng, Zhou Peizhang, Xue Xigang et al. High power laser power conditioning system preionization experimental research [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(2):178-180
- 力一峥, 周丕璋, 薛锡刚等. 强激光能源系统预电离实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2000, 12(2):178-180