

文章编号: 0258-7025(2006)03-0326-04

细长型高功率脉冲氙灯

刘建军¹, 蒋宝财¹, 唐贤忠², 林文正¹, 李海兵¹, 俞建华¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; ² 中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

摘要 高功率脉冲氙灯主要在惯性约束聚变(ICF)研究中用作高功率激光驱动器的抽运光源,其各项性能和使用寿命对高功率激光驱动器的整体工作性能影响很大。在改进制灯材料和管壁结构的基础上,研制了两种不同规格的细长型高功率脉冲氙灯:一种是 ϕ_n 16 mm,放电弧长为1140 mm;另一种是 ϕ_n 17 mm,放电弧长为1270 mm。研制的细长型高功率脉冲氙灯,其极限负载能量大、工作寿命长、辐射效率高,工作性能较原先脉冲氙灯有很大的改进和提高。

关键词 激光技术;细长型高功率脉冲氙灯;惯性约束聚变;辐射效率;极限负载能量;加速寿命实验

中图分类号 TN 245 **文献标识码** A

High Power Xenon Flashlamp with Relative Small-Bore and Large Arc-Length

LIU Jian-jun¹, JIANG Bao-cai¹, TANG Xian-zhong²,
LIN Wen-zheng¹, LI Hai-bing¹, YU Jian-hua¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
(² Shanghai Institute of Laser and Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China)

Abstract High power xenon flashlamp is mainly used in inertial confinement fusion (ICF) research as optical pump source for solid-state lasers. Its working performance and life time greatly influence the operation of lasers. A high power xenon flashlamp with relative small-bore and large arc-length is manufactured based on the development of tube material and wall structure. Two specifications are researched; one is diameter of 16 mm and arc-length of 1140 mm; the other is diameter of 17 mm and arc-length 1270 mm. The flashlamp has higher radiation efficiency compared with previous flashlamps. High explosive energy and satisfactory life time ensure its large output energy and good working stability.

Key words laser technique; small-bore large arc-length high-power xenon flashlamp; inertial confinement fusion; radiant efficiency; explosion energy; accelerated life test

1 引 言

高功率脉冲氙灯在激光惯性约束聚变(ICF)研究中用作抽运光源^[1,2]。我国神光 II 大型激光装置的不断发展,对激光能量输出和氙灯的工作性能都提出了更高的要求。

由于高功率激光器运行时,脉冲氙灯灯管内通过的大电流会产生强磁场和热等离子体冲击波;相邻灯管内电流在自身磁场下相互作用会产生很强的洛伦兹力,使得管壁在极短时间内承受巨大的弯矩

作用力,其大小随灯管长度增加而增加。在热等离子体冲击波的诱发下,灯管表现出所谓的“琴弦效应”——管身在外来强负载作用下产生抖动,因而加速灯管的破坏。原先脉冲氙灯采用掺铈石英玻璃管作为灯管材料,它有较好的截紫外光谱特性,能有效截除波长 340 nm 以下、对激光工作物质产生破坏的近紫外辐射^[3];但氧化铈等杂质的加入降低了掺铈石英玻璃管的机械强度,导致脉冲氙灯负载能量下降,在“琴弦效应”影响下,出现频繁炸灯。此外,由于灯管材料结构的限制,灯内充入氙气气压相对较

收稿日期:2005-07-18;收到修改稿日期:2005-11-04

作者简介:刘建军(1979—),男,中国科学院上海光学精密机械研究所硕士研究生,主要从事激光抽运光源材料及其性能的研究。E-mail:lzjbachelor@163.com

低,原先脉冲氙灯辐射效率还不能完全满足高功率激光装置使用的要求。在改进制灯材料和结构的基础上,研制了一种细长型高功率脉冲氙灯,其性能和指标均能符合神光Ⅱ装置的需要。

研制了两种不同规格的细长型高功率脉冲氙灯:一种是 ϕ_{in} 16 mm,放电弧长为1140 mm;另一种是 ϕ_{in} 17 mm,放电弧长为1270 mm。实验证明,这两种脉冲氙灯的性能都较原先脉冲氙灯(规格相同)有很大的提高,并已成功应用于神光Ⅱ高功率激光装置。

2 实验和数据

2.1 基本原理

一般把脉冲氙灯单次闪光供电电容器上的储能称为灯的负载能量,把灯单次闪光后灯管出现超负载条纹现象的最大负载能量称为灯的极限负载能量,通常叫作爆炸能量(单位 J)。可用 Goncz 公式表述^[4]

$$E_x = 12LD\sqrt{\tau}, \quad (1)$$

其中 L (单位 cm)为放电弧长, D (单位 cm)为灯管内径, τ (单位 μ s)为放电脉宽。因此增加放电弧长和灯管内径可以提高灯的极限负载能量,从而使灯能工作于较高的能量状态。

高的电容器-灯能量转换效率 η_e (即进灯能量效率)是用于高功率激光装置的脉冲氙灯必须满足的一个基本条件^[5]。根据公式

$$\eta_e = \frac{K'L}{K'L + DR_L I^{1/2}}, \quad (2)$$

其中 I 为灯在脉冲放电时的瞬时电流, R_L 为放电电路电阻, K' 为与充气种类和气压有关的常数,对同一种惰性气体, K' 值随气压的升高而增大。显然,增加放电弧长 L ,缩小灯管内径 D 和提高充入氙气的气压可以增加脉冲氙灯的能量转换效率。

综合以上理论及公式可知,细长型的脉冲氙灯具有更高的极限负载能量和能量转换效率。

2.2 材料结构的改进

为了解决灯管材料强度缺陷对脉冲氙灯造成的影响,研制并使用了一种复合功能石英玻璃管作为脉冲氙灯的管壁材料,它由纯石英玻璃层和掺铈石英玻璃层交叉排列钳套组成。这种复合功能石英玻璃管同时具备高纯石英玻璃的机械强度和掺铈石英玻璃截除近紫外辐射的功能。经实验测定,复合功能石英管脉冲氙灯的负载强度约比普通掺铈石英管

脉冲氙灯高12%~14%,其灯管抗弯强度也相应提高,因此很好地克服了“琴弦效应”的破坏作用。

同时,材料力学原理和相关实验表明,灯管的抗张强度随着管径的减小而增加。相比原先脉冲氙灯,其管壁厚度增加了约0.5 mm,而灯管的抗张强度却提高了20%以上。

在上述基础上制灯时,灯内充入气压较原先增加了约7.999~10.665 kPa。

2.3 辐射效率

氙灯辐射效率为

$$\eta = \frac{\iint P_\lambda(t) d\lambda dt}{CV_0^2/2}, \quad (3)$$

其中, $CV_0^2/2$ 为放电电容器储能, $P_\lambda(t)$ 为 t 时刻氙灯发出的光在波长 λ 处的光谱辐射通量。

实验发现,对于管状脉冲氙灯,总辐射能量与垂直于灯轴方向的辐射强度的时间积分之比为一常数,平均值为11.3^[6]

$$\eta = \frac{u \times 11.3}{CV_0^2/2}, \quad (4)$$

其中 u 为在垂直于灯轴方向上测得的辐射强度对时间的积分。当接收能量计为黑体,且能量计与灯管的垂直距离大于10倍灯管长度时,(4)式足够精确。

使用(4)式,测得了 ϕ_{in} 16 mm \times 1140 mm灯的效率为71%, ϕ_{in} 17 mm \times 1270 mm灯的效率为71.9%。相比原先脉冲氙灯的效率,提高了10%以上(数据为仪器实测值,未考虑线路损耗的影响)。

2.4 负载性能测试

采用加速寿命实验方法对脉冲氙灯的极限负载能量和寿命进行了检验与测试。

脉冲氙灯工作的负载系数

$$f_x = E_0/E_x, \quad (5)$$

其中 E_0 为脉冲氙灯工作能量。

利用管状脉冲氙灯的寿命公式: $m = f_x^{-8.58}$,先选定 f_x 的值(通常取0.5~0.7;按照国外文献报道高功率脉冲氙灯安全工作的 f_x 值在0.3以下^[1]),可计算得脉冲氙灯寿命 m 。当 f_x 选定后,工作能量 E_0 也相应被选定。

在选定的工作能量 E_0 条件下点灯测试脉冲氙灯的实际寿命 m' ,再与理论计算得到的 m 值进行比较,只有 $m' > m$ 才表明脉冲氙灯的极限负载符合安全要求。

将加速寿命实验测定的 m' 值导入寿命公式和(5)式,可推导出实际极限负载能量 E'_x ,然后再与(1)式计算得到的 E_x 进行比较。

根据(1)式可以估算出脉冲氙灯的极限负载能量:

对 ϕ_{in} 16 mm, 放电弧长为1140 mm的灯, 脉宽为1570 μ s, 有 $E_x = 86727$ J;

对 ϕ_{in} 17 mm, 放电弧长为1270 mm的灯, 脉宽为1350 μ s, 有 $E_x = 95192$ J。

采用电感电容放电回路对两种细长型脉冲氙灯进行了极限负载实验。如图1所示, 图中C为电容, L为电感。实验的情况和结果如表1所示。

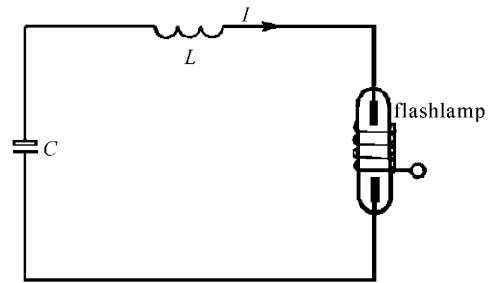


图1 电容电感放电回路

Fig. 1 Discharge circuit with capacitance and inductance

表1 脉冲氙灯极限负载实验结果

Table 1 Limited-loading energy experiments of xenon flashlamp

Specification of flashlamp /mm	Input energy E_0 /J	Explosion fraction f_x	Theoretical life-span m /shot	Experimented shots	Result of experiment
ϕ_{in} 16 \times 1140	60000	0.69	24	25	Flashlamp is nice except for a little chap on cathode surface
ϕ_{in} 17 \times 1270	66000	0.69	24	25	Flashlamp is nice

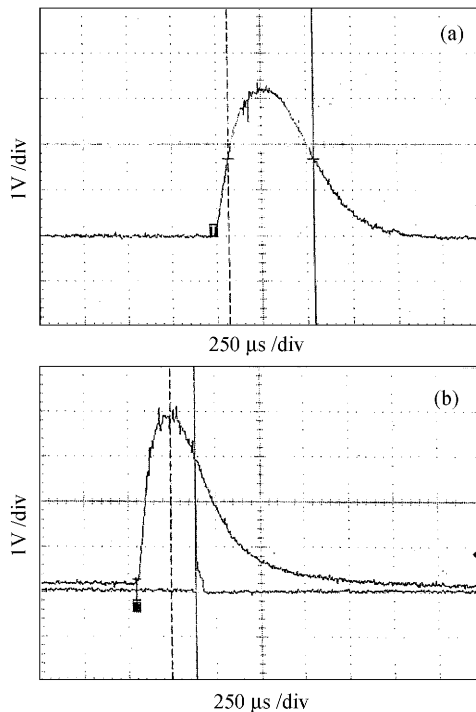


图2 ϕ_{in} 17 mm \times 1270 mm 脉冲氙灯在不同脉宽下的放电波形曲线对比

放电电路参数: (a) 120 μ F, 300 μ H, 22 kV;

(b) 120 μ F, 100 μ H, 22 kV

Fig. 2 Current waveform versus time for a 17-mm-bore, 1270-mm-arc-length flashlamp tested in different electrical circuit

circuit parameters: (a) 120 μ F, 300 μ H, 22 kV;

(b) 120 μ F, 100 μ H, 22 kV

根据实验结果推算, 发现研制的细长型高功率脉冲氙灯的实际极限负载能量 E'_x 要略大于由(1)式计算得到的 E_x 值, 即意味着脉冲氙灯具有更高的工作寿命。

此外, 对 ϕ_{in} 17 mm \times 1270 mm 脉冲氙灯作了放电对比实验, 并得到电流波形-时间曲线, 如图2所示。将其放电时间 $\tau_{1/2}$ 由502 μ s缩短到382 μ s。测试发现, 电功率有大幅度提高, 特别是上升前沿很陡, 电流密度 I_{max} 达6643 A, 灯未发生爆炸。

3 结 论

研制的细长型高功率脉冲氙灯在改进制灯材料和结构的基础上, 适当增大了氙气充入气压, 因此不仅增强了极限负载能量, 而且较大幅度地提高了其辐射效率。从而在满足高功率激光装置大能量输出要求的前提下, 保证了脉冲氙灯在高功率激光装置中工作的安全性和稳定性。研制的细长型高功率脉冲氙灯已实际运用于我国神光II高功率激光装置, 在其主机上做了20轮实验, 累计实现了2000多次的打靶成功率。

参 考 文 献

- 1 H. T. Powell, A. C. Erlandson, K. S. Jancaitis. Characterization of high power flashlamps and application to Nd:glass laser pumping [C]. SPIE, 1986, 609:78~94
- 2 V. G. Nikolaevskii, V. A. Gerasimov. On experience of flashlamps exploitation in high-power Nd-glass lasers for ICF

- [C]. *SPIE*, 1995, **2633**:583~586
- 3 Li Haibing, Hu Lili, Lin Wenzheng *et al.*. Study on properties of cerium-doped silica glass tube for xenon flash lamp [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6):654~658
李海兵, 胡丽丽, 林文正 等. 脉冲氙灯用截紫外石英玻璃管性能的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(6):654~658
- 4 John H. Goncz. New developments in electronic flashtubes [J]. *ISA. Trans.*, 1966, **5**(1):28~36
- 5 Zhou Taiming. Principle and Design of Light Source [M]. Shanghai: Publishing House of Fudan University, 1993. 306
周太明. 光源原理与设计[M]. 上海:复旦大学出版社, 1993. 306
- 6 The Compile Group of the Xenon Flashlamp. Xenon Flashlamp [M]. Shanghai: Shanghai People's Publishing House, 1975. 92
《脉冲氙灯》编写组. 脉冲氙灯[M]. 上海:上海人民出版社, 1975. 92

首届 LASER. World of Photonics (China) 展会将于近期在上海举行

两年一届在德国慕尼黑举办的 LASER. World of Photonics 是国际激光、光电子领域的顶级盛会,覆盖了从激光、光学到光电子的整条产业链。于 2005 年 6 月结束的上届展会汇集了全球 1000 多家行业领先企业,在为期四天的展会上共有近 3 万名来自全球各地的专业观众。

借助母展国际化的特点和国际影响,首届 LASER. World of Photonics China (LASER China) 将于 2006 年 3 月 21~23 日在上海隆重开幕。目前已有国内外 100 多家展商报名参展,其 70% 参展商是活跃在全球市场的国际性领先企业。展会主要分为激光元件、激光设备两大展区,展会期间还将举行多场高质量的激光技术国际研讨会。

LASER China 还将与第 5 届慕尼黑上海电子展同期同地举办,与电子工业这一激光产业的主要应用领域充分互动,共同打造全球化交流平台和国际性顶级专业盛会。

一、首届展会展商规模庞大

目前,中国激光光电子市场正以年平均 30% 的速度增长,世界各国激光光电子制造商日益认识到中国市场的重要性,德国 Spectaris 协会有 41% 的企业已与中国建立商业往来。中国市场的吸引力加上 LASER World of Photonics 的号召力,使得众多国际企业对 LASER China 表现出浓厚兴趣,决定参加首届展会。

TRUMPF, Rofin, Coherent, GSI, Jenoptik, Melles Griot, PRC, nLight, Miyachi, Spectra Physics, JDS Uniphase, Laservall, Bystronic 等国际领先企业均预定了大规模的展台,将在会期作集中展示。TRUMPF 更是在显著位置预订了 150 平方米的大型展台,展出其具有世界领先水平的激光切焊等方面的精密设备。同时,国内领先企业也毫不示弱,团结普瑞玛、大族、楚天、华工、国科、长春新产业、华北奥依特、泰德激光、海特等国内知名企业也早早预订了展位,与国际企业一争高下。这一切都预示着本届 LASER China 将一举奠定国内激光、光电子行业的顶级展会。

二、同期举行各种高质量的活动

展会期间还将推出各项高水准的同期活动,其中包括:“中德激光技术——现状、趋势与发展研讨会”,“激光器前沿技术最新发展及应用国际研讨会”,“LASER VISION”展团,以及 Intec.net 合作论坛。

“中德激光技术——现状、趋势与发展研讨会”由慕尼黑国际博览集团和汉诺威激光中心(Laser Zentrum Hannover)共同组织。该会议为期两天,将围绕激光材料加工技术现状、发展及未来趋势进行专题研讨。演讲公司包括:Coherent, Lambda Physik, Spectra Physics 以及中国科学院上海光学精密机械研究所等。中国作为世界第二大机械工具消费市场,近来又成为世界最大的机械工具进口国,激光粗加工与精细加工领域的话题将是会议热点。

“激光器前沿技术最新发展及应用国际研讨会”激光器前沿技术最新发展及应用国际研讨会将围绕固态激光器、CO₂ 激光器、纳米激光器、超短/超快/超强激光器等新型激光器前沿技术与最新应用展开讨论。到会作技术报告的科学家来自中国科学院、北京大学、天津大学、华中科技大学、华南师范大学、中国科学院上海光学精密机械研究所等科研院所。

此次研讨会得到美国相干(Coherent)公司的大力支持,将有多名来自该公司的科技专家到会发言。

“LASER VISION”展团由慕尼黑国际博览集团和 TU 柏林服务公司主办。展团旨在为德国以及其他欧洲国家的高等院校、研究机构和技术革新企业提供机会,向参展的中国和国外的专家们展示各自的研究成果和产品研发成果。

intec.net 合作论坛专门为那些正在寻求机会进入中国的企业,尤其是中型企业而设立,在特定范围内寻求合适的国际合作伙伴,安排洽谈会、组织参观相关公司,以方便有合作兴趣的国际企业同潜在的中国合作者见面洽谈。

详情您可以登录展会官方网站:www.laserchina.net,或与我们联系:

慕尼黑展览(上海)有限公司 上海市浦东新区银霄路 393 号 百安居浦东商务大厦 502 室
邮 编:201204 电 话:+86 21 50450808 传 真:+86 21 50458100
E-mail:laser@mimi-shanghai.com