

基于光斑成像的脉冲氙灯发光特性分析

王伶俐 赵友全 翟瑞伟 李霞 姜楠 刘潇

天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072

摘要 针对脉冲氙灯发光过程中光斑面积小、亮度高、脉冲闪烁的特性,提出了一种基于光学成像法捕捉氙灯发出的光脉冲。通过中性滤光片组衰减光脉冲,建立了基于电荷耦合元件(CCD)成像的光脉冲检测平台。利用脉冲氙灯控制器输出信号,触发控制连续脉冲成像,分析了脉冲氙灯发光的稳定性。通过控制脉冲高压驱动能量获得了光脉冲变化曲线。结果显示光脉冲强度随驱动回路中输入电能增加而增大,得到了与理论分析相吻合的结果。提出的光斑法可较好地应用于脉冲氙灯的光电工作特性的测试、生产质量检测和电极材料的优选。

关键词 成像系统; 光电子学; 发光特性; 光斑成像; 光脉冲; 脉冲氙灯

中图分类号 O461 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP52.061101

Analysis of Spark Properties of Xenon Flash Lamp Based on the Imaging Technology of Optical Speckle

Wang Lingli Zhao Youquan Zhai Ruiwei Li Xia Jiang Nan Liu Xiao

College of precision instrument and optoelectronics engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract According to the flaming properties of xenon flash lamp, which is of small spot size, high brightness, and flash pulse, a new method based on optical imaging to capture the pulse flash is proposed to analyze the luminescence properties of xenon flash lamp. Through a neutral filter group attenuating light pulse, a light pulse testing platform with a charge-coupled device (CCD) is established. The continuous pulsed imaging is triggered by the output signal of xenon flash lamp controller to analyse the luminous stability of xenon flash lamp. Curves of the light pulse are obtained by controlling the high-voltage pulse driver energy. The result indicates that the intensity of light pulse increases with the driver energy increasing, which is consistent with the theoretical analysis. The speckle method proposed can be better applied to the optical and electrical performance characteristics testing, quality testing and the choice of electrode material about xenon flash lamp.

Key words imaging systems; optoelectronics; luminescence properties; speckle imaging; light pulse; xenon flash lamp

OCIS codes 110.6150; 250.0250; 260.3800

1 引言

高压脉冲氙灯具有发光能量高、闪光时间短、发光光谱范围宽等优良性能,高功率氙灯是抽运激光器的重要组成部分,在光电对抗中发挥着重要作用,而低功率脉冲氙灯可以在几十到几千赫兹频率范围内频闪发光,且无需外加散热装置也可以稳定工作,目前已经作为一种分析仪器光源,用于分光光度测定、蛋白质含量分析、血细胞分析技术、癌细胞的光动力疗法^[1]及高速光学成像^[2]等领域。脉冲氙灯发光的稳定性、光脉冲能量与输入驱动电能量、脉冲触发电压、充电电容容量以及发光频率等息息相关,也与工作电极材料、电极间距和工作电压等制作工艺息息相关,研究脉冲氙灯的发光特点,对于氙灯的驱动电路设计、最佳工作条件分析和工艺材料优化等具有重要意义。

已有研究表明,电流密度在一定程度上影响氙弧的光谱特性,Rasihah等^[3]在前人工作的基础上,补充了

收稿日期: 2015-01-29; 收到修改稿日期: 2015-02-10; 网络出版日期: 2015-05-23

基金项目: 国家重大科学仪器项目资助(2011YQ15004008)、国家自然科学基金(11074134)

作者简介: 王伶俐(1990—),女,硕士研究生,主要从事图像处理方面的研究。E-mail: wlingli2008@163.com

导师简介: 赵友全(1970—),男,博士,副教授,主要从事光谱分析及仪器等方面的研究。

E-mail: zhaoyouquan@tju.edu.cn(通信联系人)

不同电流密度下的经验公式系数,基本涵盖了常见脉冲氙灯,还分析了脉冲氙灯参数对系数的影响;李丽^[4]采用示波器测试脉冲氙灯工作电压的变化,积分光度计测量脉冲氙灯的积分光强,研究了脉冲氙灯发光量与氙灯参数以及电路参数之间的关系;覃尉等^[5]提出一种电流-电压(I/V)转换电路结合高速数据采集卡的测量方案,测量脉冲氙灯辐射能量,其测量原理是分析脉冲氙灯发光时的辐照度,通过积分得到辐射能量。测试过程中发现市电和环境特别是探头周围电磁辐射对测量的结果会产生很大的干扰。MARKIEWIC和EMMETT为研究放电过程,将脉冲氙灯等效为一个可变电阻,应用回路方程对氙灯放电过程进行仿真,用阻尼系数描述了脉冲氙灯振荡现象以及影响振荡的因素,分析了振荡对脉冲氙灯发光的影响。林德江等^[6-7]利用电路方程进行仿真,研究剩余电压和电容损耗对脉冲氙灯放电特性的影响。杜志明等^[8]通过光谱仪设备,研究脉冲氙灯的光谱特性,依此来分析脉冲氙灯的发光特性。以上对脉冲氙灯发光特性的研究都是基于物理学和电学测量方法,通过电路仿真以及一些电子测试设备来研究脉冲氙灯的光电特性。

本文利用脉冲氙灯发光过程中,光斑大小、亮度及其变化与其输入电能量、驱动电路设计和触发脉冲等本质上息息相关的原理,并参考激光光斑研究方法^[9],提出一种基于光斑成像法直接测定发光脉冲光斑的方法,用光斑的强度、面积等变化表述其输入驱动、脉冲放电和发光脉冲之间的关系,研究脉冲氙灯的光、电工作特性。脉冲氙灯频闪时,光斑能量高,发光主要集中在阴极和阳极之间,会对电荷耦合元件(CCD)产生损害,不能被直接成像到CCD^[10]。通过在光路中设置中性光学衰减片组调整入射光通量,通过脉冲氙灯控制器触发光脉冲,并配置三维光学位移调整平台和CCD成像系统,搭建了脉冲氙灯光斑检测平台。该检测平台方便易用,能够快速捕获闪光脉冲。实验测定了在输入电能量变化时,脉冲氙灯发光的稳定性及光脉冲的变化情况。实验结果验证了用光学成像法研究脉冲氙灯特性的可行性和有效性。

2 脉冲氙灯发光原理

脉冲氙灯是一种通过脉冲放电形式将电能转换为辐射能的器件,储存在电容器上的能量在很短的时间内通过灯管以气体放电的形式释放,产生高亮度的辐射^[11]。

根据脉冲氙灯放电过程可知,脉冲氙灯能量主要包括主放电电路能量和触发电路能量。触发电路能量以高压脉冲形式产生放电所必须的初始自由电子,储存在回路中的能量转化为电子的动能,这部分能量在整个放电过程中所占比例较小,而主放电回路中储能电容储存能量占整个放电消耗能量的绝大部分。因为触发电路能量所占比重较少,在分析中,忽略不计。

本文中主要研究主放电电压 U 的变化对脉冲氙灯输出的影响。主放电电压指的是夹在电容两端同时也夹在两个电极之间的电压。因此,放电电压变化会直接引起极板间电场的变化。

假如放电电压由 U_0 变为 $U_0 + \Delta U$,电场强度由 E_0 增大到 $E_0 + \Delta E_0$,假设这个过程中电子都运动了距离 x ,设极板间距为 d , m_e 为电子质量,电压变化前后电子在电场中加速度的大小为

$$a_1 = \frac{eU_0}{m_e d}, \quad (1)$$

$$a_2 = \frac{e(U_0 + \Delta U)}{m_e d}. \quad (2)$$

由经典牛顿力学可以得到电子被加速前后动能大小分别为

$$W_1 = \frac{eU_0}{d} x, \quad (3)$$

$$W_2 = \frac{e(U_0 + \Delta U)}{d} x, \quad (4)$$

(3)式、(4)式的差值为

$$\Delta W = \frac{e\Delta U}{d} x. \quad (5)$$

由(5)式可知,自由电子动能随着电压的升高而升高。

与此同时,随着电压的升高,由于“碰撞电离”,脉冲氙灯中自由电子数目将雪崩似地增加,逐步形成“电子崩”^[12]。这一过程中,储存在电容上的能量经电场转化为自由电子的动能。“碰撞电离”产生的“电子崩”中自由电子的数目为

$$n = n_0 \exp(\alpha x), \quad (6)$$

式中 n_0 为阴极发射出来的初始电子数, α 为碰撞电离系数, 即沿电场方向单位长度内产生的电子数。 α 与电场 E 有关^[13]:

$$\alpha = \frac{1}{\lambda} \exp(-U_i/E\lambda), \quad (7)$$

式中 λ 为电子的平均自由程, U_i 为气体分子的电离电位。随着极板间的电场强度增大。氙气的碰撞电离系数变大, 在电子与氙离子复合过程中释放的光子数量增多, 光谱输出总能量变大。因此, 驱动回路主放电电压的变化, 能直接反映在脉冲氙灯光脉冲的变化上。脉冲触发电压、主电容、脉冲氙灯工作频率, 以及脉冲氙灯的电极材料、两电极的间距、脉冲氙灯内部充气气压等的变化, 都会对脉冲氙灯的工作特性产生影响, 而光脉冲是上述参数发生变化时的综合反映。结合脉冲氙灯发光时光脉冲具有光斑小、亮度高等特点, 用光斑成像法来研究脉冲氙灯的发光特性, 以此来分析脉冲氙灯的光电特性。

获得的脉冲氙灯光斑图像, 用图像处理技术对其进行处理, 采用合理的图像处理算法, 突出图像的有用信息, 以便于后续的数据处理与分析工作, 确保数据的精确性。

3 实验部分

实验中脉冲氙灯光斑检测平台包括脉冲氙灯、氙灯控制装置、CCD 相机、计算机(PC)、 x/y 移动平台、中性滤光片组等。其中衰减片组、氙灯都放在 x/y 移动平台上; 脉冲氙灯由灯座对其进行直立固定放置, 可根据实验需要来回移动, 以便调整光源; 脉冲氙灯与 CCD 相机在同一垂直面上, 两者之间的距离可根据实验调整; 脉冲氙灯控制装置控制脉冲氙灯工作, 由 CCD 相机获取脉冲氙灯的光斑图像。装置框图如图 1 所示。

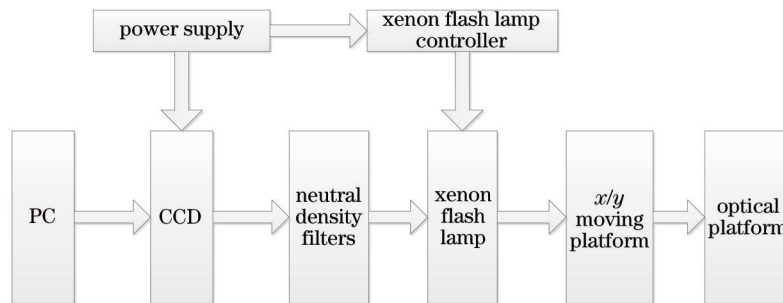


图 1 脉冲氙灯实验系统框图

Fig.1 Experimental system diagram of xenon flash lamp

利用脉冲氙灯光斑检测平台, 获得脉冲氙灯光斑图像, 用计算机对光斑图像进行处理。此实验的工作条件如表 1 所示。

表 1 脉冲氙灯实验时的工作条件

Table 1 Xenon flash lamp working conditions for experiments

Model	Arc /mm	Operating frequency /Hz	Discharge voltage /V	Main capacitor / μ f
L4640	1.5	6	700~1000	0.039

由于脉冲氙灯发光释放出较高的能量, 对 CCD 成像产生一定的干扰。当到达 CCD 光敏面的光强达到一定的阈值时, CCD 被光照射的区域会出现局部饱和, 当光照足够强时, CCD 将在电荷传输方向出现亮线, 即光饱和串扰, 甚至整个光敏区域处于饱和^[14-15]。因此, 为使 CCD 工作在线性区, 在 CCD 前放置衰减片组, 对脉冲氙灯的光脉冲进行衰减。

通过读入脉冲氙灯光斑的数据矩阵, 分析光斑的光强分布。图 2(a)是在光斑中心横向水平线上的灰度分布图, 从中可以判断光强是否饱和, 图 2(b)是整幅光斑图像的灰度直方图, 从中可得到脉冲光斑图像的整体灰度分布。

不断调整中性滤波片组, 观察脉冲氙灯光斑图像的强度分布图和灰度直方图, 直到得到符合要求的衰减量。同时, 安装在 CCD 下的衰减片组能够抑制绝大部分的背景光。脉冲氙灯的光脉冲经过中性滤波片组后照射在 CCD 光敏面上, 得到符合要求的脉冲氙灯光斑图像。

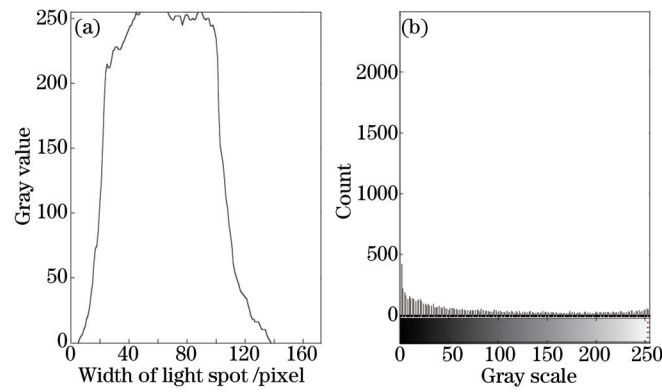


图2 脉冲氙灯光斑图像。(a) 强度分布图; (b) 灰度直方图

Fig.2 Spot of xenon flash lamp. (a) Intensity profile; (b) gray level histogram

4 结果与分析

利用脉冲氙灯光学检测平台,调整并固定 CCD 相机与脉冲氙灯的距离,以确保获取最佳的图像,确定滤光片组,用触发脉冲控制 CCD 进行拍照。对得到脉冲氙灯的光斑图像进行处理,首先进行去噪处理,将光斑图像转化为灰度图像,并根据脉冲氙灯灰度图像的直方图信息选择合适的阈值,阈值的选取是正确识别、分析光斑图像的关键;然后根据阈值,将光斑图像进行二值化;最后对二值化后的图像进行形态学处理^[16-17]。最终得到仅含光斑在内的二值化图像。图3是一定电压下,脉冲氙灯的光斑图像和二值化后的光斑图。

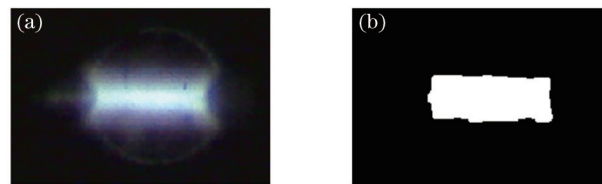


图3 (a) 脉冲氙灯的光斑图; (b) 二值化后的光斑图

Fig.3 (a) Spot picture of the xenon lamp flash; (b) spot after binaryzation

对二值化图进行数学统计,得到光斑的尺寸为

$$D = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |g(m,n) = 1|, \quad (8)$$

式中 $g(m,n)$ 为二值图像 (m,n) 处的强度; M 、 N 为图像的维数。结合(8)式及脉冲氙灯发光原理,分析脉冲氙灯发光时的稳定性情况及随着驱动回路中输入能量变化脉冲氙灯的光脉冲能量的变化情况。

4.1 输出稳定性

用光斑成像法分析脉冲氙灯的稳定性,通过研究在同一条件下脉冲氙灯光斑像素数情况,可以得出,脉冲氙灯一段时间内光脉冲的幅度变化情况。实验中电压的变化范围是 700~1000 V,电压每次升高 25 V,每次采集 15 幅图像。

图4是在同一条件,不同电压下,脉冲氙灯光斑像素点数的变化波动情况。

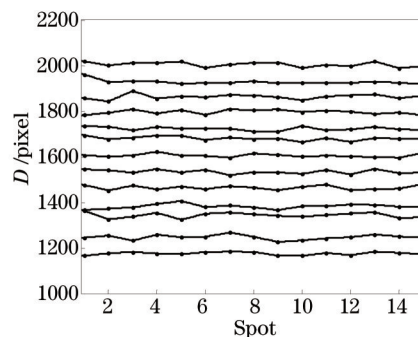


图4 光斑尺度变化情况

Fig.4 Change of Spot size

为了更准确地分析脉冲氙灯发光的稳定性,用计算脉冲氙灯光斑像素数的稳定性公式进行分析,计算公式如下:

$$D_s = \frac{P_H - P_L}{P_{ave}} \times 100\%, \quad (9)$$

式中 P_H 是在同一电压下,最高的像素数; P_L 是最低的像素数; P_{ave} 是均值后的像素数。

表2为连续脉冲成像的条件下,脉冲氙灯发光的稳定性情况。

表2 脉冲氙灯工作时的稳定性情况

Table 2 Stability conditions of the xenon flash lamp

Voltage /V	700	725	750	775	800	825	850	875	900	925	950	975	1000
Volatility /%	1.5317	3.2882	2.8286	2.8942	1.9115	1.8249	1.6195	1.7852	1.4508	1.5030	2.4681	2.1784	1.4961

从表2可以看出,脉冲氙灯工作的主放电电压在800~925 V时,脉冲氙灯发光的稳定性相较于其他电压条件下更好。

4.2 驱动能量变化对光脉冲强度的影响

随电压升高,脉冲氙灯光脉冲强度变化趋势如图5所示。

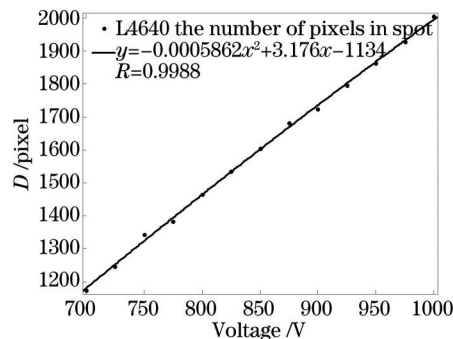


图5 光脉冲能量随输入能量的变化情况

Fig.5 Change of the spot with the voltage increasing

曲线拟合方程式为

$$y = -0.0005862x^2 + 3.176x - 1134, \quad (10)$$

曲线拟合的相关系数 $R=0.9988$ 。由(10)式可知,脉冲氙灯的光脉冲与驱动能量成二次关系,随着主放电电压的升高,光脉冲强度逐渐增大,但方程的二次项系数很小,趋近于直线增长。

由(6)式可知自由电子数目随驱动能量增加迅速增大,同时由(7)式可知驱动能量增加后,极板间的电场强度增大。因此随着放电电压的升高,氙气的碰撞电离系数变大,在电子与氙离子复合过程中释放的光子数量增多,光斑像素数增大。

根据上述分析,实验结果与理论分析相对应,即随驱动回路中输入能量的增加,脉冲氙灯的光脉冲强度逐渐增大。

由脉冲氙灯的工作原理可知,氙灯脉冲能量为

$$J = \frac{1}{2}CV^2, \quad (11)$$

$$E = Jf, \quad (12)$$

式中 J 为 J /次, V 为主电压, C 为电容, E 为能量, f 为频率。

实验中,所用的电容非常小,是 10^{-7} 数量级的。而且驱动能量的变动被限定在一定的范围内,在变化范围内整体来看,曲线比较平缓,电压和输出功率近似成正比关系。驱动能量越大,脉冲氙灯输出功率越高,电压和输出能量近似于正比关系^[8]。

对(10)式进行求导,求导后的方程为

$$y = -0.0011724x + 3.716. \quad (13)$$

由(13)式可知,曲线斜率随着驱动回路中输入电压的升高而减小,主放电电压每增高25 V,曲线斜率减小很少,仅为0.02931。这也间接证明了光斑像素数随驱动能量的变化近似于正比关系。

为了更好地进行描述,定义一新的概念光脉冲变化尺度(CES),其与电压的关系如图6所示。

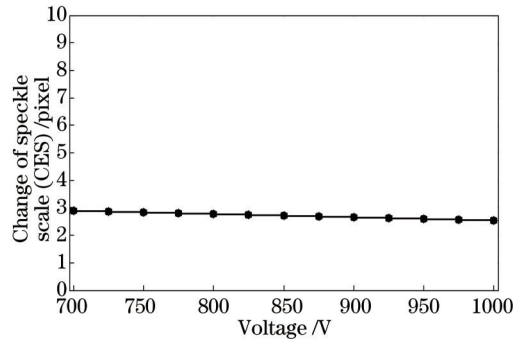


图6 光脉冲变化尺度

Fig.6 Change of light pulse scale

由图6可知脉冲氙灯光脉冲变化尺度随着电压的升高而降低。根据气体放电理论,脉冲氙灯放电过程中,如果等离子体被排斥到极板之外无法完成复合,或者其复合过程发生在放电结束后的一段时间,这两种情况都会减小放电过程中电子到光子的转化。

随着驱动能量的不断升高,自由电子被加速到了更高的速度,气体的电离率变大,根据 Saha 方程,当等离子体温度升高,扩散运动会加速,这就会使更多的自由电子被排斥到脉冲氙灯极板以外的区域,导致部分自由电子无法在放电极短的时间内完成复合,最终无法实现光子的发射。因此脉冲氙灯的光脉冲变化尺度随着驱动能量的升高而减小。实际在主放电电压不断升高的过程中,被排斥到无用区的自由电子数目的增加是有限的,所以光斑变化尺度的变化幅度特别有限。从图6可以看出,光脉冲变化尺度随着驱动能量的升高而减小,但是其变化幅度非常小,趋于一定值。

综上所述,用光斑成像法能较直观地反应出脉冲氙灯发光的稳定性及随着驱动回路中输入能量的升高光脉冲强度的变化情况,反应了脉冲氙灯的发光特性。

5 结 论

通过对脉冲氙灯的发光原理、放电过程,以及主放电电压发生变化时脉冲氙灯光脉冲的变化进行分析,结合脉冲氙灯的光脉冲,提出了一种基于光斑成像法来检测脉冲氙灯发光特性的新方法,分析脉冲氙灯的电特性。设计了脉冲氙灯光斑检测平台,利用触发控制信号得到脉冲氙灯光斑图像。实验结果表明:脉冲氙灯工作电压在 800~925 V 范围时,其工作稳定性较好;随驱动回路中输入能量的增大,脉冲氙灯的光脉冲与主放电电压成二次关系;随主放电电压升高,光脉冲强度逐渐增大,整体趋向于正比关系。提出的研究脉冲氙灯光电特性的新方法不仅得出脉冲氙灯的稳定情况,而且得到脉冲氙灯随输入能量变化时光脉冲强度的变化趋势。实验结果与理论分析相一致,说明用此方法研究脉冲氙灯的光电特性是可行的。该方法对脉冲氙灯生产工艺的提高具有重要的作用,同时,有利于脉冲氙灯在分析仪器及激光领域的推广。

参 考 文 献

- 1 Kimura, M Kashikura, K Yokoi S, *et al.*. Photodynamic therapy for cancer cells using a flash wave light xenon lamp[J]. *Optical Review*, 2005, 12(3): 207-210.
- 2 Zhang Guangsheng. The technology of xenon flash lamp in the application of high-speed photography[J]. *High Energy Density Physics*, 2006, 3: 15-18.
张光升. 脉冲氙灯技术在高速摄影中的应用[J]. *高能量密度物理*, 2006, 3: 15-18.
- 3 Ignatius J Rasiah, B C Tan, H W Lee, *et al.*. Voltage-current relationship for flashlamps: an empirical approach[J]. *Applied Optics*, 1991, 30(4): 485-488.
- 4 Li Li. The characteristics analysis and application of xenon flash lamp[J]. *Electro-Optic Warfare & Radar Passive Countermeasures*, 2001, 1: 42-47.
李 丽. 脉冲氙灯特性分析及应用[J]. *光电对抗与无源干扰*, 2001, 1: 42-47.
- 5 Qin Wei, Wang Qianqian, Peng Zhong, *et al.*. A new way of approach Xe-lamp radiant energy[J]. *Optical Technique*, 2006, 32: 105-107.

- 覃 尉, 王茜倩, 彭 中, 等. 脉冲氙灯辐射能量的一种新式测量方法[J]. 光学技术, 2006, 32: 105-107.
- 6 Lin Dejiang, Zhang Chu, Chen Xin, *et al.*. Research on the effect of residual voltage on the discharging characteristics of xenon flash lamp[J]. Optial Instruments, 2012, 34(4): 40-43.
- 林德江, 张 维, 陈 欣, 等. 剩余电压对脉冲氙灯放电特性的影响研究[J]. 光学仪器, 2012, 34(4): 40-43.
- 7 Zhang Chu, Lin Dejiang, Shen Hongbin, *et al.*. Effect of capacitor loss on discharging characteristics of xenon flash lamp[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(10): 2474-2478.
- 张 维, 林德江, 沈洪斌, 等. 电容损耗对脉冲氙灯放电特性的影响[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(10): 2474-2478.
- 8 Du Zhiming, Pan Haiyan, Ding Yukui. Research on radiation characteristics of pulse Xe-lamp and saturated behaviors of photo-detector PbS[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2005, 25(8): 722-725.
- 杜志明, 潘海燕, 丁玉奎. 脉冲氙灯光学特性及对PbS探测器光饱和和失效研究[J]. 北京理工大学学报, 2005, 25(8): 722-725.
- 9 Xu Wenyu, Bai Tingzhu, Liu Yang, *et al.*. Real-time laser facula detection based on top-three-neighborhood-region continuous-pixels numbering[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1212002.
- 徐文宇, 白廷柱, 刘 洋, 等. 基于上三邻域连续点计数的激光光斑实时检测[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1212002.
- 10 Qian Fang, Sun Tao, Guo Jin, *et al.*. Dynamic assessment of laser-dazzling effects based on the character of laser-spot and image feature[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0609004.
- 钱 方, 孙 涛, 郭 劲, 等. 基于光斑与图像特征的动态激光干扰效果评估[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0609004.
- 11 Guo Xiangchao, Li Haibing, Lin Wenzheng, *et al.*. Discharge of pulse Xenon lamps[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(6): 1363-1366.
- 郭向朝, 李海兵, 林文正, 等. 大功率脉冲氙灯的放电研究[J]. 光子学报, 2009, 38(6): 1363-1366.
- 12 Liu Huawei. Computer Simulation of Electron Avalanche Process for Gas Insulation in Short Gap and Discharge Signal Acquisition[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2004.
- 刘华伟. 气体绝缘短间隙电子崩过程计算机仿真及放电信号采集[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2004.
- 13 Guan Genzhi. High Voltage Engineering Foundation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003: 16-17.
- 关根志. 高电压工程基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003: 16-17.
- 14 Qiu Dongdong, Zhang Zhen, Wang Rui, *et al.*. Mechanism research of pulsed laser induced damage to CCD imaging devices[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0214006.
- 邱冬冬, 张 震, 王 睿, 等. 脉冲激光对CCD成像器件的破坏机理研究[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0214006.
- 15 Guo Shaofeng, Cheng Xiang'ai, Fu Xiquan, *et al.*. Failure of array CCD irradiated by high-repetitive femto-second laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(11): 1783-1786.
- 郭少锋, 程湘爱, 傅喜泉, 等. 高重复频率飞秒激光对面阵CCD的干扰和破坏[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(11): 1783-1786.
- 16 Zhang Haizhuang, Meng Zhiyong, Ding Shuai, *et al.*. Research on collection of laser image with CCD[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2013, 11(5): 33-35.
- 张海庄, 孟智勇, 丁 帅, 等. CCD摄像法采集激光光斑图像方法研究[J]. 光学与光电技术, 2013, 11(5): 33-35.
- 17 Yao Hongbing, Zheng Xueliang, Ma Guidian, *et al.*. Research on lens-defects type recognition based on image processing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(11): 111003.
- 姚红兵, 郑学良, 马桂殿, 等. 基于图像处理的镜片疵病类型识别研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(11): 111003.
- 18 Zhao Youquan, Li Rongsheng. A new highlight controllable xenon flash lamp[C]. Across the Taiwan Strait Eighteenth Lighting Technology and Marketing Conference, 2011: 1-6.
- 赵友全, 李荣生. 一种新型高亮可控脉冲氙灯光源[C]. 海峡两岸第十八届照明科技与营销研讨, 2011: 1-6.

栏目编辑: 张 雁