

doi: 10.3788/gzxb20164501.0135002

可用于高速摄影脉冲氙灯的研究

黄春雷^{1,2}, 李海兵¹, 林文正¹, 胡丽丽¹

(1 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为了研究储能电容初始电压、电极间距、充气压及灯管内径等条件对脉冲氙灯电流脉冲和发光脉冲的影响, 在电极间距 100~300 mm、充气压 13.33~53.32 kPa、灯管内径 6~12 mm、储能电容初始电压 1.75~4.25 kV 的条件下, 分别测量了脉冲氙灯的电流脉冲和发光脉冲的变化状况。测量得到脉冲氙灯的电流脉冲宽度和发光脉冲宽度均在 15~45 μs 之间。对比发现: 储能电容初始电压较高有助于获得高峰值、窄脉宽且滞后时间短的电流脉冲; 具有较高充气压或较长电极间距的脉冲氙灯其电流脉冲与发光脉冲的峰值较小、脉冲宽度较大, 且发光脉冲滞后时间较长; 较粗灯管内径虽然可以增加电流脉冲的峰值, 但电流脉冲的宽度被增宽, 发光脉冲峰值减小, 发光脉冲宽度展宽, 且延长了发光脉冲的滞后时间。

关键词: 图像处理; 高速摄影; 脉冲氙灯; 电流脉冲; 光脉冲; 脉冲宽度; 滞后时间

中图分类号: O432.1+1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)01-0135002-6

Research on Flash Lamps Usable to High Speed Photography

HUANG Chun-lei^{1,2}, LI Hai-bing¹, LIN Wen-zheng¹, HU Li-li¹

(1 Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to study the influence of the initial voltage, arc length, fill pressure and bore diameter of charging capacitor on current pulses and light pulses of the xenon flash lamps, at a pressure of 13.33~53.32kPa, the change of current pulses and light pulses were measured with the arc length of 100~300mm, the bore diameters of 6~12mm and the initial voltages in charging capacitor ranging from 1.75kV to 4.25kV. It was found that the pulse widths of light pulse and current pulse change from 15 μs to 45 μs . The result showed that with the higher voltage in charging capacitor, stronger peak current could be obtained, the width and delay of light pulses reduced. High fill pressure or long arc length can diminish the strength of peak light, expand the width of light pulses and extend the delay time. Although big bore diameter raises the peak current, it also expands the width of light pulses and diminishes the strength of peak light.

Key words: Image processing; High speed photography; Flash lamps; Current light; Light current; Pulse width; Lag time

OCIS Codes: 350.4800; 350.5610; 230.6068; 300.2140; 300.6540; 300.6550

0 引言

脉冲氙灯由密闭石英管内充入的氙气及石英管两端的两个电极组成, 当脉冲氙灯处于工作状态时, 加在电极两端的高电压脉冲击穿氙气放电, 产生强烈的光

芒。工作在较高电压下时, 脉冲氙灯的辐射特性接近于黑体辐射, 等效的黑体辐射温度与电流峰值密度有很大的关系^[1-2]。作为高功率固体激光器泵浦, 脉冲氙灯具有高负载、高效率、高亮度、宽光谱及结构简单等优点^[1-2], 被广泛用于固体激光器^[3-5]、检测^[6]、仪器设

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61177083)资助

第一作者: 黄春雷(1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为脉冲氙灯的辐射. Email: huangsiom@163.com

导师(通讯作者): 李海兵(1975-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为脉冲氙灯的性能. Email: lhb184@sina.com

收稿日期: 2015-02-09; 录用日期: 2015-09-08

<http://www.photon.ac.cn>

备^[7]、光化学、信号光源、高速摄影等领域。脉冲氙灯辐射的光谱访问涵盖深紫外到远红外,可以根据需要获取强烈的紫外线输出,因此近年来在杀菌、水处理、食品安全等领域也受到了人们的关注^[8-11]。

从 20 世纪 60 年代开始,随着激光技术的兴起,对脉冲氙灯的研究逐渐增多。J. H. Goncz^[12]总结了脉冲氙灯内部电阻率与电流密度之间的关系,为脉冲氙灯的设计及应用奠定了理论基础;J. P. Markiewicz、J. L. Emmett 和 J. F. Holzrichter 等^[13-14]详细的研究了脉冲氙灯的工作电路与电流波形;Kenneth, A. Lincoln^[15]研究了电容能量对螺旋形脉冲热辐射的影响;Y. Nakashima^[16]研究了脉冲氙灯的工作电流、触发电流及发光稳定性。Masafumi Jinno 等^[17-18]研究了充有 Xe 或 Xe-Ne 的脉冲灯的放电特性,及脉冲灯的端电压、电流与波长为 828 nm 的光波形随时间的变化;Hatem Elloumi 等^[19]提出了一种圆柱形脉冲氙灯等离子体辐射的数学模型,可以获得等离子体的径向温度分布、瞬时辐射光谱等;M. Gnybida 等^[18]提出了一种圆柱形脉冲氙灯等离子体轴向放电的数学模型,可以获得放电等离子体中轴向电场、轴向电子密度的量子行为等随时间的变化,模拟结果与实验结果一致。近年来,国内对脉冲氙灯的研究也逐渐增多,陈佳等^[20]研究了脉冲氙灯等离子体电阻的规律;刘建军等^[21-24]研究了脉冲氙灯的放电沟道;赵友全等^[25]从量子理论角度研究了脉冲氙灯的放电过程。但是有关脉冲氙灯电流脉冲与发光脉冲相互关系的研究鲜有报道。

本文主要研究了储能电容初始电压、脉冲氙灯电极间距、充气压、灯管内径等条件对脉冲氙灯电流脉冲和发光脉冲的影响,获得了脉冲氙灯的工作特性以及发光特性。

1 实验装置

实验中采用的电路如图 1,预电离高压充电系统向电容 C_2 充电,当电压达到一定值之后,气体开关 S_1 导通, C_2 放电,通过变压器 T_1 获得高压电离脉冲点灯内部气体,电流通过二极管 D_1 预燃脉冲氙灯。通过预电离电路使脉冲氙灯处于预电离状态,有助于脉冲氙灯主放电电路更容易导通。主高压充电系统向储能电容 C_1 充电,信号发生器发出脉冲信号,使得晶闸管导通,电容 C_1 对脉冲氙灯放电,脉冲氙灯点燃。电路中还使用了罗柯夫斯基线圈,以获得电路中的电流脉冲信号。光电管接收脉冲氙灯辐射的光信号并将其转换为电信号输送给示波器。实验中使用的示波器为 Tektronix 公司生产的 TDS3034B 示波器,充电电容 $C_1 = 5.0 \mu\text{F}$,光电管的型号为 GD51Q,主高压充电系统、预电离高压充电系统以及信号发生器都是根据需要自行设计定制的。通过调节信号发生器,可以达到控制脉冲氙灯闪光

频率的目的。

对于不同的脉冲氙灯,实验分成三组,分别观察脉冲氙灯的充气压、电极间距、灯管内径对脉冲氙灯的放电电流脉冲和发光脉冲的影响,并观察电容初始电压改变的过程中,脉冲氙灯的电流脉冲和发光脉冲的变化情况。

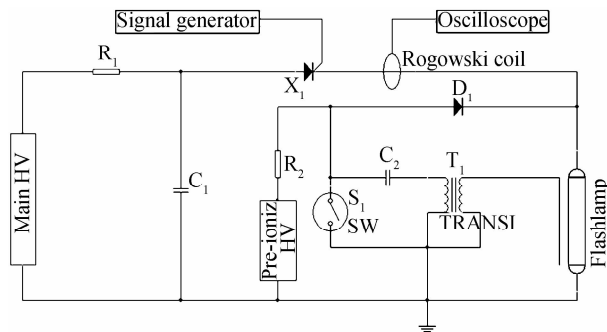


图 1 脉冲氙灯的测试电路

Fig. 1 Schematic diagram of the experiment setup

2 数据与分析

2.1 储能电容的影响

实验中选取脉冲氙灯参数为充气压 $p = 13.33 \text{ kPa}$,灯管内径 $\Phi = 6 \text{ mm}$,电极间距 L 分别为 100 mm、150 mm、200 mm、250 mm 和 300 mm。高压充电系统可以将储能电容的初始电压充至 $1.75 \text{ kV} \sim 4.25 \text{ kV}$ 的范围。实验得到储能电容初始电压与电流峰值变化规律如图 2。可以看到,随着电容初始电压的增大,电流峰值也增大;对于电极间距 $L = 150 \text{ mm}$ 的脉冲氙灯,电流峰值从 533 A 增加到了 1980 A。储能电容电压升高,一方面脉冲氙灯内部的放电沟道变粗;另一方面,脉冲氙灯内部获得高能量的气体带电粒子数目更多,等离子体温度升高,气体电离度增加,带电粒子的密度增加。两者都降低了脉冲氙灯自身的电阻,从而增加了电流峰值。值得注意的是,对于同一支脉冲氙灯,电流峰值随储能电容初始电压呈现近似的线性关系。

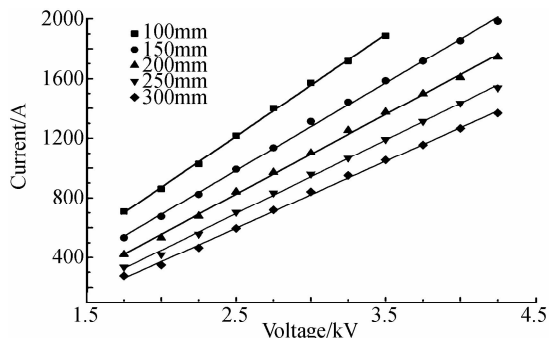


图 2 电流峰值随电容初始电压的变化关系

Fig. 2 Peak current versus initial voltage in charging capacitor

图 3 展示了不同电极长度之间,脉冲宽度随电容初始电压变化的数据对比。随着储能电容初始电压的

增加,脉冲氙灯的电流脉冲宽度减小;在较高电压下,电流脉冲宽度随储能电容初始电压变化很小,甚至几乎不再变化.这可能是因为,在电容初始电压足够大时,脉冲氙灯的电流沟道在较短时间内充满于整个脉冲氙灯的灯管内径,并且脉冲氙灯内部气体的电离度达到足够大,致使即便电容初始电压再有所增加,对于脉冲氙灯的电感及电阻都改变不大.

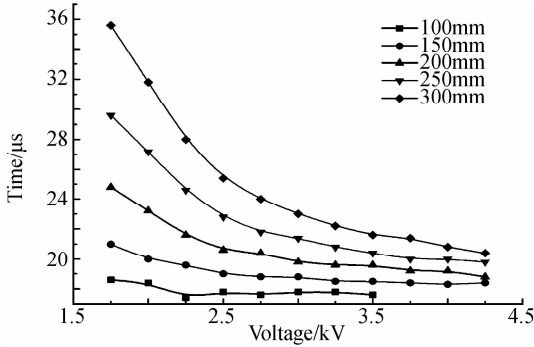


图3 电流脉宽随电容初始电压变化的关系
Fig. 3 Width of current pulses as a function of initial voltage in charging capacitor

脉冲氙灯的电流脉冲受到储能电容初始电压的影响很大,那么脉冲氙灯的发光脉冲也必定受到储能电容初始电压很大的影响.脉冲氙灯的电流脉冲与发光脉冲如图4,可以看到,总体上电流脉冲波形与发光脉冲波形十分相似.但是发光脉冲总会滞后于电流脉冲一段时间,这是因为气体在发光之前,气体带电粒子需要一定的时间加速然后碰撞其它气体粒子所造成的.光脉冲滞后电流脉冲会影响到高速摄影的效果及使用,因此研究光脉冲的滞后时间显得十分重要.

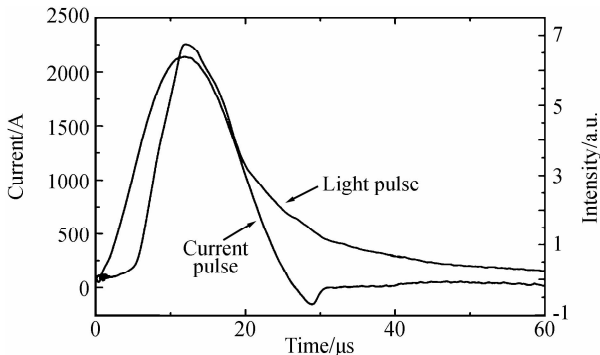


图4 电流脉冲和光脉冲之间的关系
Fig. 4 The relationship between current pulse and light pulse

图5~7展示了储能电容初始电压不同情况下,发光脉冲参数的变化趋势.随着储能电容初始电压的增加,发光脉冲峰值增加,发光脉冲的脉冲宽度减小,发光脉冲滞后电流脉冲的时间也减小.脉冲氙灯在发光之前,储能电容初始电压越大,气体粒子经过一定的平均自由程所需要的时间越短,发光脉冲的脉宽变小.储能电容初始电压越大,在一定的平均自由程内,气体带

电粒子被加速到较高能量的可能性就越大,高能态粒子数目增多,气体粒子之间的碰撞造成激发态粒子的可能性就会增大,因而发光脉冲的峰值增加.

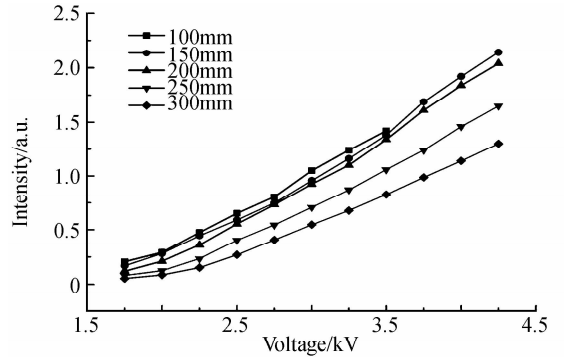


图5 光脉冲峰值随电容初始电压变化的关系
Fig. 5 Peak light as a function of initial voltage in charging capacitor for various arc lengths

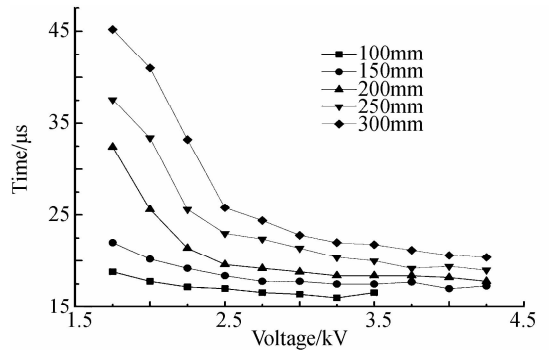


图6 光脉冲宽度随电容初始电压变化的关系
Fig. 6 Width of light pulses as a function of initial voltage in charging capacitor for various arc length

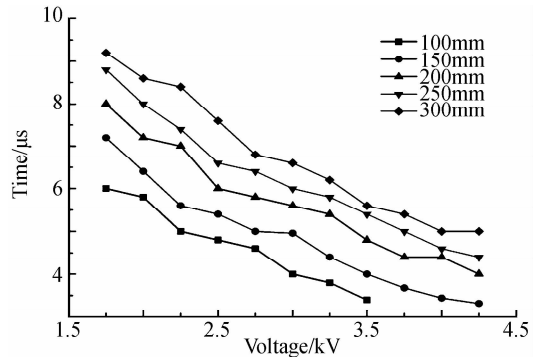


图7 光脉冲滞后时间随电容初始电压变化的关系
Fig. 7 Delay between light pulses and current pulses as a function of initial voltage in charging capacitor for various arc length

2.2 电极间距的影响

从上一小节的实验研究中可以发现,电极间距对脉冲氙灯的电流脉冲影响较大.从图2中可以发现,相同电容初始电压情况下,电极长度越大,电流峰值越小.图8显示出了电容初始电压为 $U=3.50\text{ kV}$ 条件下电流峰值和电流脉冲宽度与电极间距之间的关系,当电极间距从 $L=100\text{ mm}$ 增加到 $L=300\text{ mm}$ 时,电流

峰值从 1 887 A 减小到了 1 040 A, 电流脉宽从 17.6 μs 增加到了 21.6 μs . 在类稳态阶段, 脉冲氙灯相当于一导体, 电极间距越大, 则导体越长, 脉冲氙灯的内阻以及电感越大; 此外, 脉冲氙灯内部等离子体温度也会随着电极间距的增大而降低, 从而降低了脉冲氙灯内部等离子体的电离度, 增加了等离子体的阻抗. 所以, 增加电极间距降低了脉冲氙灯的电流峰值, 同时也增加了电流脉冲的宽度.

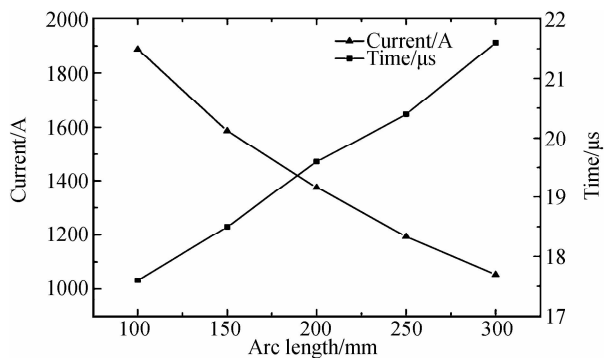


图 8 电流峰值和电流脉冲宽度随电极间距变化的关系 ($U=3.50\text{ kV}$)

Fig. 8 Peak current and width of current pulses versus arc lengths for initial voltage at 3.50 kV in charging capacitor

在同一储能电容初始电压情况下, 通过对不同电极间距的发光脉冲的参数进行对比, 如图 9、图 10 所示, 可以看到随着电极间距从 100 mm 增加到 300 mm 过程中, 发光脉冲峰值相对强度减小, 发光脉冲的宽度从 16.6 μs 增加到了 21.8 μs , 发光脉冲滞后于电流脉冲的时间从 3.4 μs 增加到了 5.6 μs . 电极间距的增加导致电极之间的电场强度降低, 在平均自由程不变的情况下, 在碰撞之前气体带电粒子获得较高能量的机会降低, 高能态粒子数目减少, 气体发生碰撞产生激发

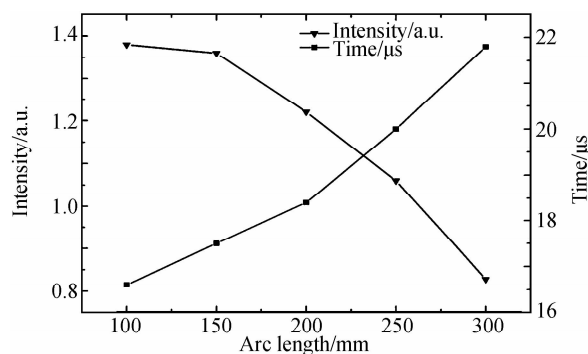


图 9 光峰值和光脉冲宽度随电极间距变化的关系 ($U=3.50\text{ kV}$)

Fig. 9 Peak light and width of light pulses as a function of arc length for initial voltage at 3.50 kV in charging capacitor

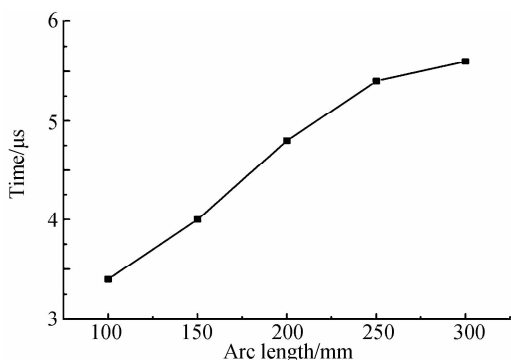


图 10 光脉冲滞后时间随电极间距变化的关系 ($U=3.50\text{ kV}$)

Fig. 10 Delay between light pulses and current pulses versus arc length for initial voltage at 3.50 kV in charging capacitor

态粒子的可能性减小, 所以发光脉冲的峰值减小, 发光脉冲的宽度增加, 发光脉冲滞后于电流脉冲的时间增加.

2.3 充气压的影响

实验中, 脉冲氙灯的参数选择为内径 $\Phi=6\text{ mm}$, 电极间距 $L=200\text{ mm}$, 充气压分别选择 $p=13.33\text{ kPa}$ 、 19.995 kPa 、 26.66 kPa 、 33.325 kPa 、 39.99 kPa 、 46.655 kPa 、 53.32 kPa .

图 11 显示了储能电容初始电压为 $U=4.25\text{ kV}$ 时, 电流峰值和电流脉宽与灯管内充气压之间的关系. 可以看到, 充气压从 13.33 kPa 增加到 53.32 kPa 过程中, 电流峰值从 1969A 下降到了 1600A, 脉冲宽度从 13.8 μs 上升到了 15.8 μs . 充气压与平均自由程成反比, 充气压越大, 脉冲氙灯内部带电粒子的平均自由程就越小, 带电粒子在纵向运动中获得能量就越慢, 脉冲氙灯等效电阻也就越大. 所以为了获得同样大小的电流峰值, 充气压越大需要的储能电容初始电压也就越高. 此外, 脉冲氙灯内部的充气压越大, 脉冲氙灯的着火电压越高, 脉冲氙灯越不易于点燃.

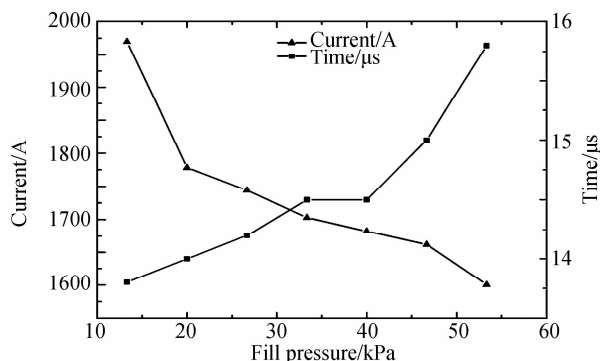


图 11 电流峰值和电流脉冲宽度随充气压变化的关系 ($U=4.25\text{ kV}$)

Fig. 11 Peak current and width of current pulses as a function of fill pressure for 4.25 kV initial voltage

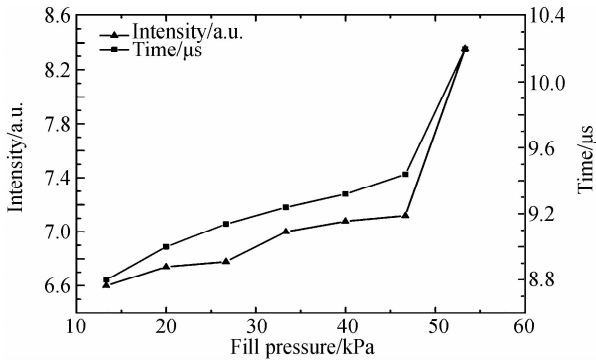


图 12 光峰值和光脉冲宽度随充气压变化的关系 ($U=4.25\text{ kV}$)

Fig. 12 Peak light and width of light pulses as a function of fill pressure for initial voltage at 4.25 kV in charging capacitor

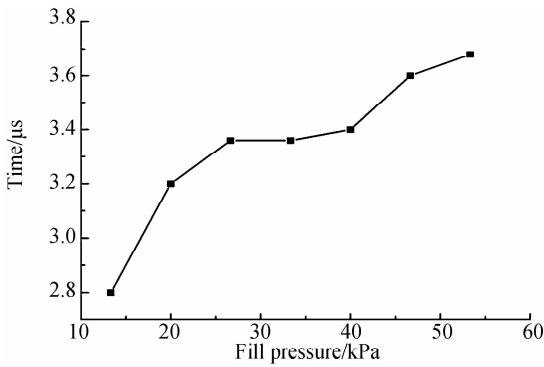


图 13 光脉冲滞后时间随充气压变化的关系 ($U=4.25\text{ kV}$)
Fig. 13 Delay between light pulses and current pulse as a function of fill pressure for initial voltage at 4.25 kV

2.4 灯管内径的影响

实验采用脉冲氙灯的参数为电极间距 $L=200\text{ mm}$, 充气压 $p=13.33\text{ kPa}$, 内径分别为 $\phi=6\text{ mm}, 8\text{ mm}, 9\text{ mm}, 10\text{ mm}, 12\text{ mm}$. 图 14 是电容初始电压为 $U=4.25\text{ kV}$ 条件下, 电流峰值和脉宽与脉冲氙灯内径的关系. 在同一电容初始电压下, 内径从 6 mm 增加到 12 mm 时, 电流峰值从 1744 A 增加到了 2140 A , 但是

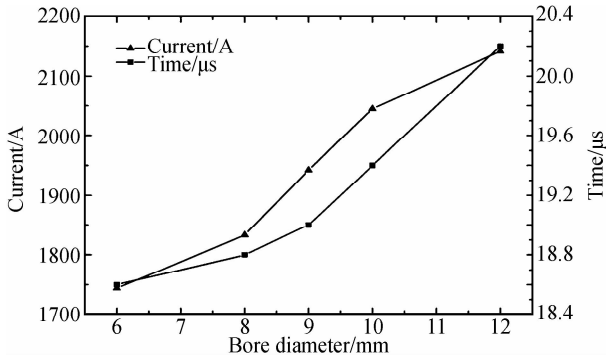


图 14 电流峰值和电流脉冲宽度随内径变化的关系 ($U=4.25\text{ kV}$)

Fig. 14 Peak currents and width of current pulses as a function of bore diameter for initial voltage at 4.25 kV

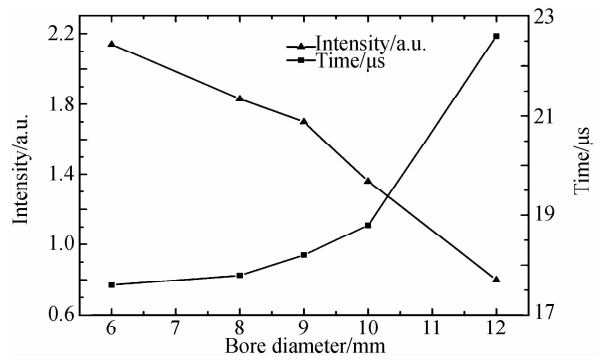


图 15 光峰值和光脉冲宽度随内径变化的关系 ($U=4.25\text{ kV}$)
Fig. 15 Peak light and width of light pulses as a function of bore diameter for initial voltage at 4.25 kV

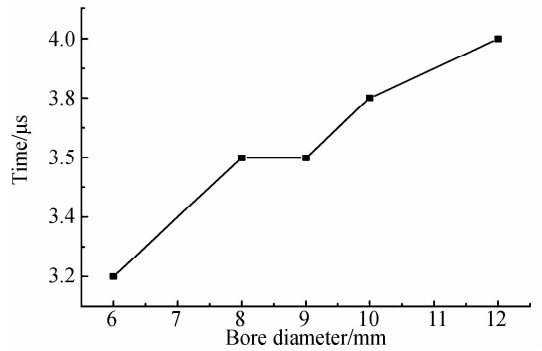


图 16 光脉冲滞后时间随内径变化的关系 ($U=4.25\text{ kV}$)
Fig. 16 Delay between light pulses and current pulses versus bore diameter for initial voltage at 4.25 kV

通过计算发现脉冲氙灯的电流峰值密度从 6172 A/cm^2 下降到了 1894 A/cm^2 . 相比于较粗内径的脉冲氙灯, 相同电容初始电压条件下, 较细的脉冲氙灯产生了较细的导电沟道, 但是提升了等离子体温度, 增加了气体粒子的电离度, 降低了导电沟道的电阻率, 提高了导电沟道的电流密度. 因此, 在相同储能电容初始电压的条件下, 随着灯管内径的增加, 脉冲氙灯的发光脉冲峰值会减小, 发光脉冲的脉宽和滞后于电流脉冲的时间都会增加, 如图 15、图 16 所示.

3 结论

通过大量的实验研究表明, 脉冲氙灯电流峰值随着电容初始电压的增加而近似于线性的增加; 电流脉冲宽度随着电压的增加而减小. 与此同时, 随着储能电容初始电压的增加, 脉冲氙灯的发光脉冲峰值增加, 发光脉冲宽度和滞后于电流脉冲的时间减小. 同一初始电压条件下, 电极间距越大, 电流脉冲峰值越小, 电流脉冲宽度越大; 发光脉冲峰值越小, 发光脉冲宽度越大. 所以电流脉冲峰值随着脉冲氙灯充气压的增加而减小, 电流脉宽增加; 发光脉冲峰值降低, 发光脉冲宽度增加. 虽然电流峰值随着脉冲氙灯灯管内径的增加而增加, 但是发光脉冲峰值减小, 发光脉冲宽度增加.

另外, 脉冲氙灯在工作过程中, 电路参数对脉冲氙

灯电流脉冲的影响很大,对于需要获得更小电流脉冲宽度和更小发光脉冲宽度的应用情况下,应当尽量减小电路中的电感。

综上所述,在实用脉冲氙灯作为高速摄影光源的过程中,为了获得更小的曝光时间短且发光强度大的光脉冲,需要减小脉冲氙灯的充气压,减小脉冲氙灯的电极间距,减小脉冲氙灯的内径,并减小电路中的电感,增加储能电容的初始电压。

参考文献

- [1] 周大明,周详,蔡伟新.光源原理与设计[M].2版.上海:复旦大学出版社,2006:366-391.
- [2] 《脉冲氙灯》编写组.脉冲氙灯[M].上海:上海人民出版社,1975:1-135.
- [3] RAULIN C. Laser and flashlamp systems[J]. *Hautarzt*, 2008, **59**(2):90-91.
- [4] YANG Q, MA Y, ZHU R, et al. The effect of flashlamp pulsed dye laser on the expression of connective tissue growth factor in keloids[J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2012, **44**(5): 377-383.
- [5] ERLANDSON C, POWELL H T. 10,000 flashlamps will drive most-powerful laser[J]. *Laser Focus World*, 1991, **27**(8):95-100.
- [6] ZHAO Feng-zhi, WANG Zhong-dong, ZHENG Ya-juan. A detecting system with full fluorescence spectrum for pesticides[J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(01): 82-84
赵凤芝,王忠东,郑亚娟.农药荧光全光谱检测与系统研究[J]. *光学技术*, 2008, **34**(01): 82-84.
- [7] ROOS S, RAULIN R, OCKENFELS H-M, et al. Successful treatment of cutaneous sarcoidosis lesions with the flashlamp pumped pulsed dye laser; a case report[J]. *Dermatologic Surgery*, 2009, **35**(7):1139-1140.
- [8] CHARLES F, VIDAL V, OLIVE F, et al. Pulsed light treatment as new method to maintain physical and nutritional quality of fresh-cut mangoes[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2013, **18**:190-195.
- [9] BARANDA B, BARRANCO A, Martinez I. Fast atrazine photodegradation in water by pulsed light technology[J]. *Water Research*, 2012, **46**(3):669-678.
- [10] GOMEZ-LOPEZ V M, RAGAERT P, DEBEVERE J, et al. Pulsed light for food decontamination: a review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2007, **18**(9): 464-473.
- [11] PANICO L. Pulsed UV curing provides user-friendly solutions to tough problems[J]. *Adhesives Age*, 1997, **40**(1): 34-36.
- [12] GONCZ J H. Resistivity of xenon plasma[J]. *Journal of Applied Physics*, 1965, **36**(3P1): 742-743.
- [13] MARKIEWI J P, EMMETT J L. Design of flashlamp driving circuits[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1966, **QE 2**(11): 707-711.
- [14] HOLZRIK J F, EMMETT J L. Design and analysis of a high brightness axial flash lamp[J]. *Applied Optics*, 1969, **8**(7): 1459-1466.
- [15] MCDONALD K F, CURRY R D, HANCOCK P J. Comparison of pulsed and CW ultraviolet light sources to inactivate bacterial spores on surfaces[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2002, **30**(5): 1986-1989.
- [16] JINNO M, OKAMOTO M, TAKEDA M, et al. Luminance and efficacy improvement of low-pressure xenon pulsed fluorescent lamps by using an auxiliary external electrode[J]. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 2007, **40**(13): 3889-3895.
- [17] JINNO M, KUROKAWA H, AONO M. Fundamental research on mercuryless fluorescent lamps I - Inner electrode operation with pulsed discharge[J]. *Japanese Journal of Applied Physics Part 1-Regular Papers Short Notes & Review Papers*, 1999, **38**(7B): 4608-4612.
- [18] ELLOUMI H, ZISSIS G, BERTHIER T, et al. Time-dependent behavior of a pulsed high power xenon flashlamp. Application to the Mega-Joule laser pumping[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2004, **86**(4): 361-369.
- [19] GNYBIDA M, UHRLANDT D, LOFFHAGEN D. Investigation of a pulsed xenon discharge at medium pressure[J]. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 2012, **45**(19).
- [20] CHEN Jia, LI Hai-bing, JIANG Bao-cai, et al. Research on the impedance of plasma in xenon flashlamp during discharging[J]. *Laser and Infrared*, 2009, **39**(02):190-193.
陈佳,李海兵,蒋宝财,等.脉冲氙灯放电时等离子体电阻的研究[J]. *激光与红外*, 2009, **39**(02): 190-193.
- [21] GUO Xiang-chao, LI Hai-bing, LIN Wen-zheng, et al. Discharge of pulse xenon lamps[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(06):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**(06): 1363-1366.
- [22] LIU Jian-jun, LI Hai-bing, HU Li-li, et al. Influence of external electric field and pre ionization on characteristics of discharge plasma in high-power xenon flashlam[J]. *High Voltage Engineering*, 2013, **39**(9):2267-2272.
- [23] JIA Shen-li, LI Xing-wen, LI Rui, et al. Study of the plasma channel characteristics in high power pulsed xenon flashlamps[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, **24**(01): 248-252.
贾申利,李兴文,李瑞,等.高功率脉冲氙灯中的等离子体放电通道研究[J]. *强激光与粒子束*, 2012, **24**(01): 248-252.
- [24] LIU Jian-jun, JIANG Bao-cai, TANG Xian-zhong, et al. High power xenon flashlamp with relative small-bore and large arc-length[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(03): 326-329.
刘建军,蒋宝财,唐贤忠,等.细长型高功率脉冲氙灯[J]. *中国激光*, 2006, **33**(03): 326-329.
- [25] ZHAO Quan-you, MIAO Pei-liang, HE Feng, et al. Study on the discharge properties of xenon flash lamp and experimental measurement[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **34**(7):1978-1982.
赵友全,苗佩亮,何峰,等.脉冲氙灯放电过程分析与实验测定[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, **34**(07):1978-1982.