

引用格式: XUAN Hao, LIU Yongan, QIANG Pengfei, et al. Design and Modulation Performance of Ultrafast Light-controlled Pulsed X-ray Tube with Photocathode[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(7):0725001

宣浩,刘永安,强鹏飞,等. 基于光电阴极的超快 X 射线源设计及调制性能研究[J]. 光子学报, 2021, 50(7):0725001

# 基于光电阴极的超快 X 射线源设计及调制性能研究

宣浩<sup>1,2</sup>, 刘永安<sup>1</sup>, 强鹏飞<sup>1</sup>, 苏桐<sup>1</sup>, 杨向辉<sup>1</sup>, 盛立志<sup>1</sup>, 赵宝升<sup>1</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院大学 光电学院, 北京 100049)

**摘要:**为解决基于热阴极的传统 X 射线管灯丝发射结构脆弱、能量效率低以及散热等问题,设计了一种新型光控脉冲 X 射线管装置。通过光电阴极与光源的参数匹配,选择蓝光波段量子效率高的 S20 阴极与波长为 460 nm 的 LED 光源。模拟计算确定 X 射线管整体结构设计。最终实现最大 2.37 mA 的管电流,光电阴极电子发射效率为 0.288 mA/lm,出射 X 射线能量 0~25 keV 可调。另外,基于光控脉冲 X 射线管出射 X 射线强度易调制的特性,进行不同频率加载信号还原实验和任意 X 射线轮廓还原实验。

**关键词:** X 射线源; X 射线分析与应用; 光电阴极; 光电阴极应用; 调制

中图分类号: O462.3

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215007.0725001

## Design and Modulation Performance of Ultrafast Light-controlled Pulsed X-ray Tube with Photocathode

XUAN Hao<sup>1,2</sup>, LIU Yongan<sup>1</sup>, QIANG Pengfei<sup>1</sup>, SU Tong<sup>1</sup>, YANG Xianghui<sup>1</sup>, SHENG Lizhi<sup>1</sup>, ZHAO Baosheng<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

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

**Abstract:** In order to solve the easy-broken structure, low energy efficiency and heat dissipation of the traditional X-ray tube with filament based on thermionic cathode, a novel light-controlled pulsed X-ray tube device is deostrated in this paper. By matching the parameters of photocathode and light source, S20 cathode with high quantum efficiency and LED with 460 nm wavelength were selected. At the same time, the overall structure design of the X-ray tube is determined by the simulation. Finally, the maximum tube current of 2.37 mA is realized, the electron emission efficiency of photocathode is 0.288 mA/lm, and the output X-ray energy is adjustable from 0 to 25 keV. In addition, based on the characteristics of easy-access to be modulated of the light-controlled pulsed X-ray tube, different frequencies input signal restoration experiment and arbitrary contor X-ray restoration experiment was carried out.

**Key words:** X-ray source; X-ray analysis-application; Photocathode; Photocathode-application; Modulation

**OCIS Codes:** 250.0250; 230.0250; 260.6048; 340.7480

基金项目: 国家自然科学基金(No.61901470, U1931138), 中国科学院空间科学战略先导科技专项(No. XDA15020501-04), 中国科学院“西部之光”人才培养引进计划(No.XAB2018A07), 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室基金(No.SKLIPR2021)

第一作者: 宣浩(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向 X 射线产生与探测。Email: xuanhao18@mailsucas.ac.cn

导师: 盛立志(1980—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为 X 射线探测与应用技术。Email: lizhi\_sheng@opt.ac.cn

收稿日期: 2021-02-02; 录用日期: 2021-03-30

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

## 0 引言

X射线管作为辐射成像<sup>[1]</sup>、安防安保<sup>[2]</sup>和医学检测<sup>[3]</sup>等应用领域的核心部件,对相关应用系统的搭建和整体性能如成像分辨率等具有重要影响。目前使用的传统X射线管,轰击阳极靶的电子主要来自加热的灯丝,即热阴极结构<sup>[4]</sup>。但是受限于热阴极电子发射的自身缺陷,存在响应时间慢、出射X射线强度快速调制困难<sup>[5]</sup>、能量转换效率低和发热量大等问题,对相关系统的散热设计和设备性能的进一步提高造成阻碍,不能满足现代各领域内对大流量、高速调制以及低能耗的X射线管的需求。

光电转换材料通过光电效应将光子转换为电子,被广泛应用在夜视仪、光电探测器等领域。其中对可见光响应、光生电子产额大的多碱阴极如S20等,是一种制备工艺成熟、工作稳定性高的电子发射材料<sup>[6]</sup>,依托此设计的电子发射器件是一种理想的X射线管电子产生结构。相比于目前新型X射线源如碳纳米管冷阴极X射线管<sup>[7-8]</sup>、激光-等离子体X射线源<sup>[9-10]</sup>和自由电子激光X射线源<sup>[11]</sup>等,基于光电阴极的X射线管体积小、结构稳定,并且能量效率高,出射X射线强度调制更轻松。国外相关研究报道的基于光电阴极的X射线管,管电流仅有50  $\mu\text{A}$ ,实际应用受限<sup>[12-13]</sup>;增加了电子倍增打拿极结构后,管电流达到mA量级,但是结构相对复杂<sup>[14-15]</sup>。

本文利用光电阴极电子发射路线,通过光电阴极材料选型与光源匹配,设计出一种大管电流、易调制和对光源超快响应的光控脉冲X射线管,同时在不同调制频率下,对该光控脉冲X射线管的调制性能进行了研究。

## 1 光控脉冲X射线管设计

光控脉冲X射线管整体结构主要分为四个部分,分别为光源、光电阴极、阳极靶和高压供电。

光源部分由两颗LED与调制电路组成,通过调整LED功率实现出射X射线强度调制。LED器件的调制速率可达MHz量级<sup>[16]</sup>,满足光控脉冲X射线管调制性能的设计需求。由于实验中采用的多碱阴极量子效率的峰值在波长为400~500 nm之间,选择单色、波长为460 nm的LED作为X射线管光源(特性如表1所示),并将LED固定在铝散热器上,防止长时间工作后LED器件的累计热量对LED性能产生影响。

表1 LED(460 nm)特性参数  
Table 1 Characteristics of LED (460 nm)

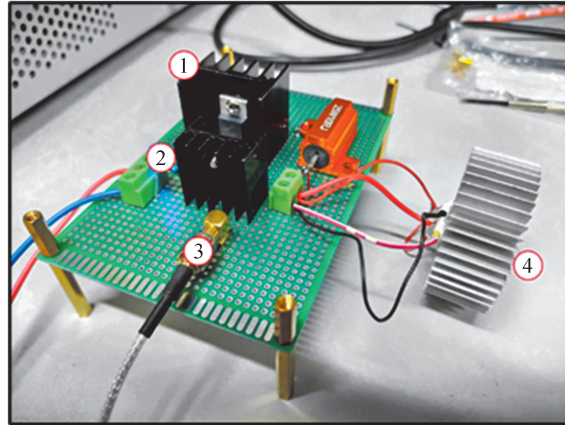
| Properties            | Parameters  |
|-----------------------|-------------|
| Emission wavelength   | 460 nm      |
| Rated power           | 3 W         |
| Pulse repetition rate | DC to 4 MHz |
| Divergence angle      | 120°        |

LED调制驱动电路采用恒流源设计,利用MOSFET IRF510控制LED电流的导通,实现电流调制以传输信息:当调制信号处于高电平时,MOSFET导通,LED发光,光电阴极产生电子;当调制信号处于低电平时,MOSFET截止,LED关闭,光电阴极无电子。实际实验电路如图1。

光电阴极部分如图2(b),采用直径为41 mm的石英玻璃作为光源入射窗,并在其内层表面通过热蒸发的方式,蒸镀合适厚度的多碱阴极材料。理论上通过波长为460 nm的光源照射后,足够多数目的光电子会在球管内部电场的作用下,形成内部管电流。制备光电阴极时,利用仪器实时对光电阴极的积分灵敏度进行测量,最终稳定在0.117 mA/lm。

光电阴极在外部光源激发下产生的光电子分布在光电阴极发射面上,较大的电子束截面会对打靶效率和出射X射线的质量造成较大影响,因此需要在光电阴极与阳极靶之间设计一个聚焦结构,减小电子束轰击阳极靶的束斑尺寸。实验中,采用如图2(b)所示的聚焦环(Focus Ring)结构。金属聚焦环能够改变光电阴极与阳极靶之间的电场分布,实现电子束聚焦。从图3(a)所示的模拟计算结果可以看出,从光电阴极平面发射后,在金属聚焦环的作用下,电子束截面明显缩小,在阳极靶上获得较理想的束斑尺寸。通过模拟不同高度聚焦环的聚焦效果,最终确定聚焦环高度为10.0 mm,电子轰击情况如图3(b)所示,多数电子与

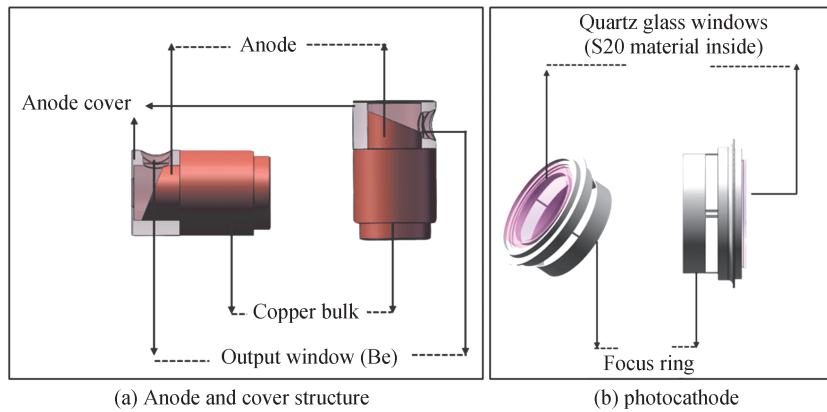
阳极靶的轰击发生在直径为 15.1 mm 的圆内, 有效轰击面积约为 114 mm<sup>2</sup>。



1. Operational amplifier OPA548T
2. MOSFET IRF510
3. Input port for signal
4. LED (460 nm) on aluminum heat sink

图 1 LED 调制电路

Fig.1 LED modulation circuit

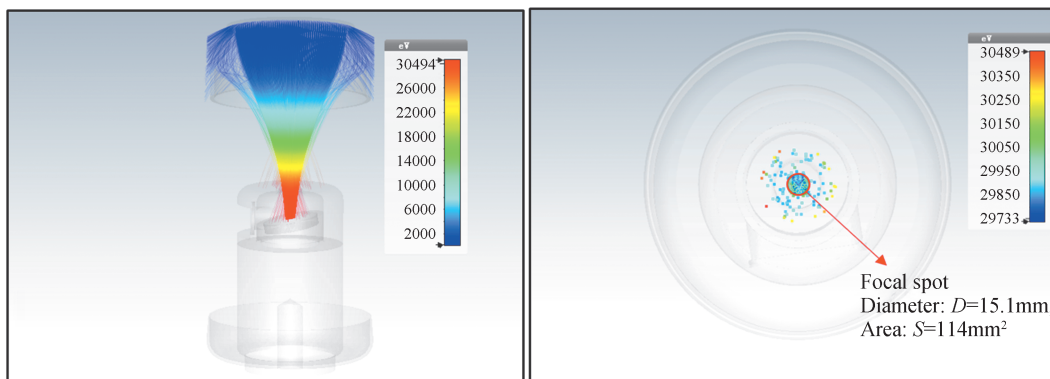


(a) Anode and cover structure

(b) photocathode

图 2 光控 X 射线管阳极和阴极结构

Fig.2 Anode and photocathode parts of light-controlled pulsed X-ray tube



(a) Electron focus simulation

(b) Electron bombardment simulation

图 3 光电阴极发射电子聚焦模拟图

Fig.3 Focus simulation of the electron emitted from photocathode

设计的光控 X 射线管采用反射式阳极靶结构, 阳极靶是直径为 23.36 mm 的钨靶, 固定在直径 30 mm、高度 48 mm 的铜散热柱上。除了聚焦环结构, 还在阳极靶外部增加一个如图 2(a) 的阳极罩结构, 将聚焦效果

不理想的电子阻挡在该结构外,防止这些电子到达阳极靶表面。为了在X射线管内形成电子加速电场,设计中将阳极靶连接正高压,光电阴极与聚焦极接地。设计的光控脉冲X射线管结构图如图4。

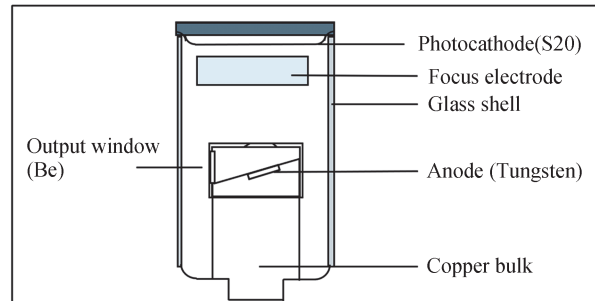


图4 光控脉冲X射线管结构图

Fig 4 Schematic diagram of the light-controlled pulsed X-ray tube

## 2 实验过程

对光控脉冲X射线管的性能参数测量、优化时,需要确定光电阴极入射窗与光源之间的最佳距离,保证光功率的前提下使光源尽可能的覆盖光电阴极。为简化计算,将LED视为朗伯光源,模拟与光源不同距离处 $20\text{ cm}\times 20\text{ cm}$ 平面上光功率分布情况,如图5所示。根据模拟计算,将LED光源与光电阴极入射窗之间的距离设定为 $2\text{ cm}$ ,一方面可以保证光电阴极被充分照射,另一方面也确保长时间工作中LED的发热不会对光电阴极产生影响。实验中通过改变阳极高压和LED功率对管电流特性和稳定性进行研究。

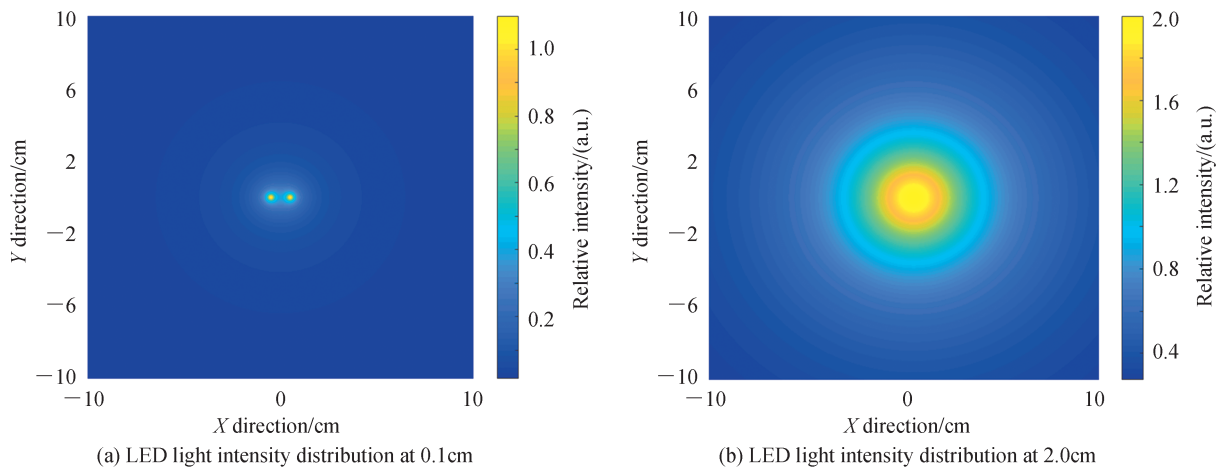


图5 距离光源不同位置处LED光源强度分布模拟

Fig.5 Simulation on light intensity distribution at different distance

由于LED参数和光电阴极超快响应的特性,光控X射线管相比热阴极X射线管更容易实现出射X射线强度调制。调制实验测试流程如图6所示,将不同频率的方波信号加载到LED调制电路中,通过示波器观察还原信号。另外,实验中通过将任意波形输入信号幅值归一化后,与LED电流一一对应,记录出射X射线光子不同时刻的强度信息,实现任意波形的信号轮廓还原。

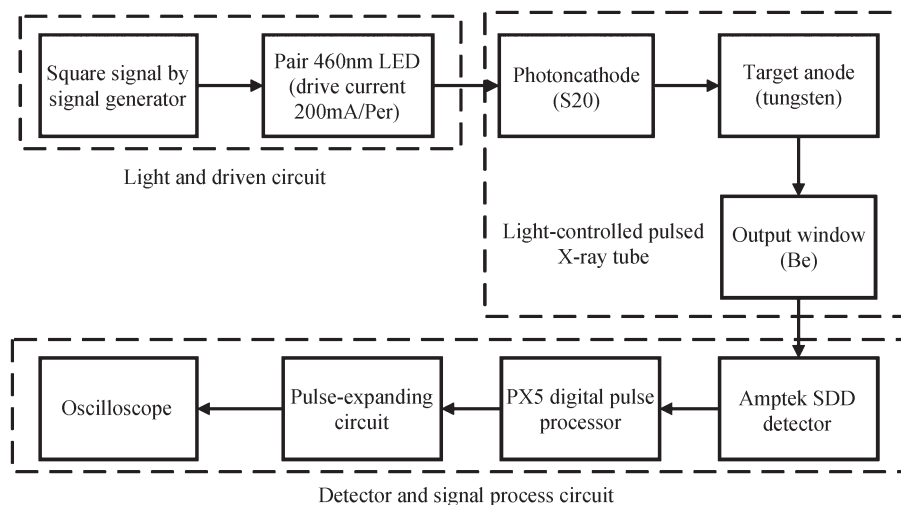


图6 光控脉冲X射线管调制实验测试流程

Fig. 6 Schematic diagram of the experiment to the modulation ability of X-ray tube

### 3 结果与讨论

#### 3.1 管电流特性

为研究阳极靶高压与X射线管管电流之间的关系,分别将LED功率设定为0.130 W、0.256 W、0.381 W、0.556 W、0.710 W和0.870 W,阳极靶高压由10 kV逐渐提高到25 kV,观察管电流变化情况,实验结果如图7所示。当阳极高压提高到某一数值,球管内可以探测到管电流后,同一LED功率,不同阳极高压下管电流数值的标准差分别为0.005 83,0.008 99,0.012 69,0.015 76,0.018 71,0.022 42,管电流数值变化较小;但X射线管管电流随着LED功率的增加而增加,LED功率从0.130 W增加到0.870 W的同时,管电流平均值从0.18 mA增加至0.99 mA。

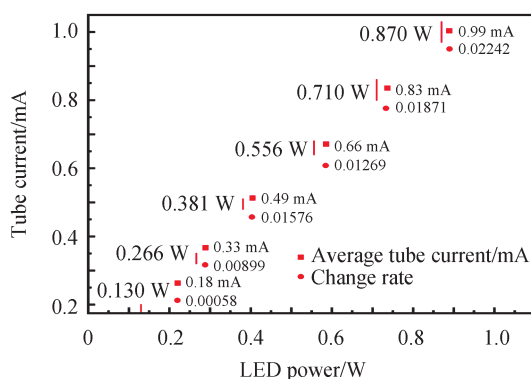


图7 不同LED功率,不同阳极电压条件下管电流变化范围情况

Fig.7 Range of tube current in different anode voltage with different LED

基于上述实验结果,在测量LED功率与管电流关系时,忽略阳极高压的影响。实验条件为LED与光电阴极入射窗距离为2 cm、阳极高压固定为10 kV,实验结果如图8所示。从实验结果来看,X射线管管电流数值随LED功率增加而变大;当LED功率增加到3.23 W时,管电流达到最大值2.37 mA。根据计算,所研制的光电阴极的电流发射密度为0.178 mA/cm<sup>2</sup>,在460 nm积分灵敏度密度为0.238 mA/lm×cm<sup>2</sup>,此时光生电子数达到饱和。

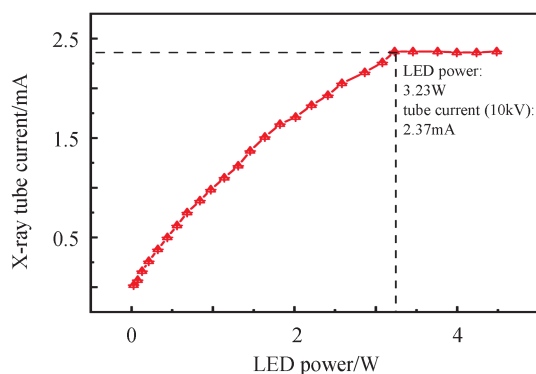


图8 管电流随LED功率变化情况

Fig. 8 The relationship between LED power and tube current

光控脉冲X射线管中另一个重要参数是出射X射线流量的稳定性。实验中在管电流分别为 $100\ \mu\text{A}$ 和 $1\ \text{mA}$ 两种状态下,保持阳极电压为 $12\ \text{kV}$ ,测试时间为 $40\ \text{min}$ ,每隔 $30\ \text{s}$ 读取探测器的计数率。出射X射线光子计数率随时间的变化如图9。出射X射线光子计数率基本保持稳定,在 $100\ \mu\text{A}$ 小管电流条件下,出射X射线计数率的变化率小于 $1\%$ ;而在 $1\ \text{mA}$ 大管电流的条件下,出射X射线计数率的变化率约为 $2\%$ 。实验结果说明,大管电流下光控脉冲X射线管出射X射线流量的稳定性稍差于小管电流下的出射情况。分析原因因为大管电流情况下在阳极靶上累计的热量对出射X射线光子流量的稳定性会造成一定影响,但是总体上光控脉冲X射线管的出射流量稳定性较高。

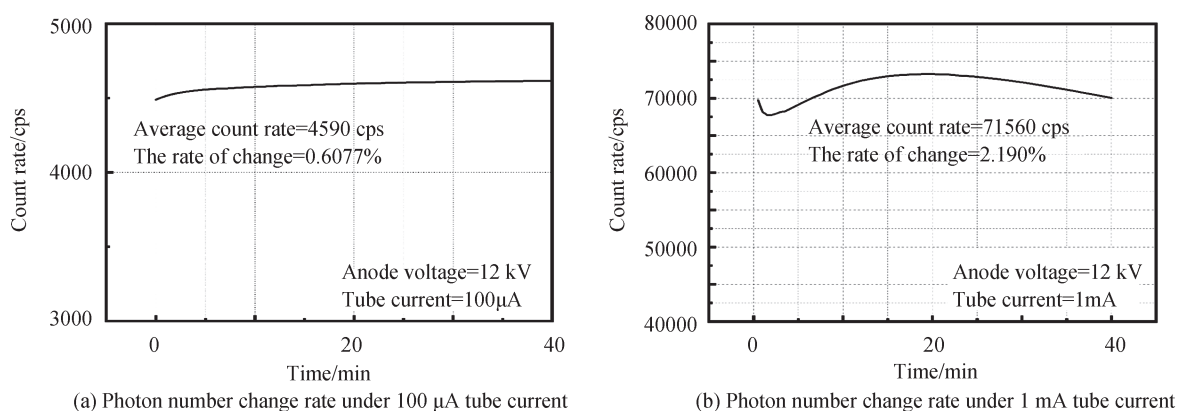


图9 不同强度管电流条件下出射X射线光子数目变化率

Fig.9 Change rate of X-ray photon number under different tube current

### 3.2 调制性能测试

与传统的热阴极X射线管相比,光控脉冲X射线管易于调制。调制特性测试的实验原理是:使用Amptek公司的XR-100硅漂移探测器(SDD)和PX5脉冲处理器,当探测器探测到X射线时,PX5会产生脉冲信号。利用外部电路通过改变探测阈值来消除噪声信号,检测有效脉冲信号。假设在一个输入信号周期 $T_{in}$ 中检测到 $N$ 个X射线光子,每个脉冲将扩展为一个脉冲宽度为 $t_{ex}$ 的方波信号。在这种情况下,输出恢复波形的脉宽为 $T_{out}=N \times t_{ex}$ ,在各种实验条件下,通过调节电阻值来改变 $t_{ex}$ 。调制性能实验结果如图10所示,其中黄色为加载信号,蓝色为探测器输出脉冲,红色为脉冲展宽电路输出信号。

从上述实验结果可以看出,不同调制速率下影响波形还原的主要因素为脉冲展宽电路和单个信号周期内光子数。图10(a)所示的 $1\ \text{kHz}$ 还原信号由于脉冲展宽电路的限制,脉冲展宽到 $10\ \mu\text{s}$ 后,展宽信号仍然不能连续;当输入信号频率升高至 $60\ \text{kHz}$ 后,部分周期内信号能够完美还原,但受限于出射X射线总光子数,无法满足单个信号周期内存在足够多的光子信号,因此部分信号周期内还原信号宽度被展宽或被压缩;输入信号频率上升到 $100\ \text{kHz}$ 后,还原波形宽度与输入信号基本一致,但受限于LED的响应速率,无法在输入信号上升沿发光,因此产生的X射线与输入波形在时间上存在延后现象。随着调制速率的进一步增加,脉

冲宽度展宽电路和X射线光子数目都影响还原波形,还原波形时间延迟严重。因此,要想实现更高调制速率的X射线管,在之后的研究中需要考虑提高X射线光子的数目。

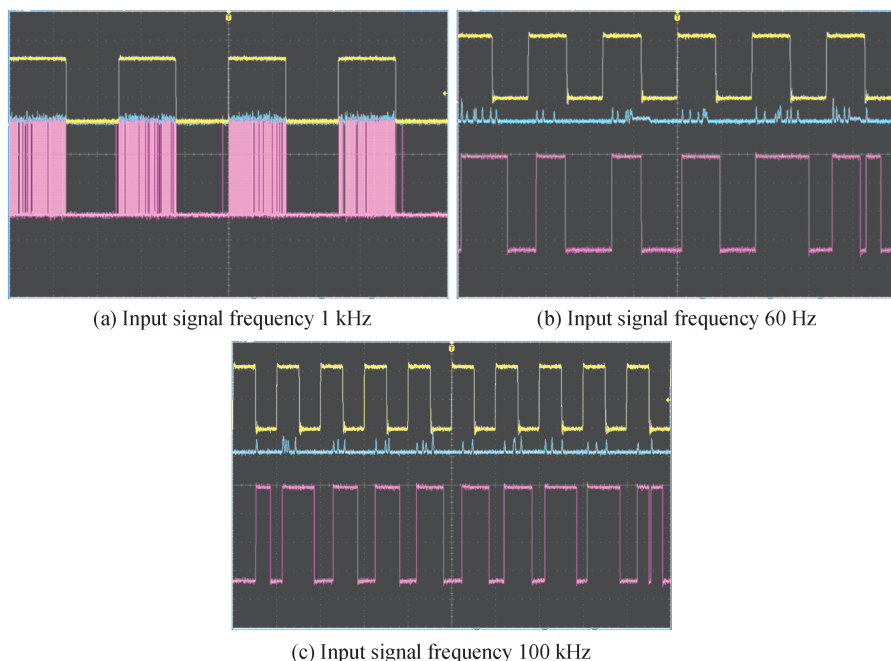


图10 不同频率输入信号加载波形还原情况

Fig.10 Restored waveform situation with input signal in different frequencies

在任意波形轮廓还原实验中,将两颗LED的最大电流设定在400 mA,将幅值为4 V的高斯脉冲作为输入信号,幅值归一化后与LED电流一一对应。探测器记录不同时刻内的光子计数率,归一化后即可还原输入的高斯脉冲波形。实验结果如图11。在不同阳极高压下,还原轮廓与输入的高斯脉冲轮廓相似度均高于99%。这说明,设计的光控脉冲X射线管,除了能够实现“0,1”信号的X射线通断控制外,还能通过控制出射X射线强度,实现任意轮廓的X射线信号的产生。上述调制实验结果初步说明光控脉冲X射线管在空间X射线通信、脉冲星导航地面模拟验证等科学研究中存在应用前景。

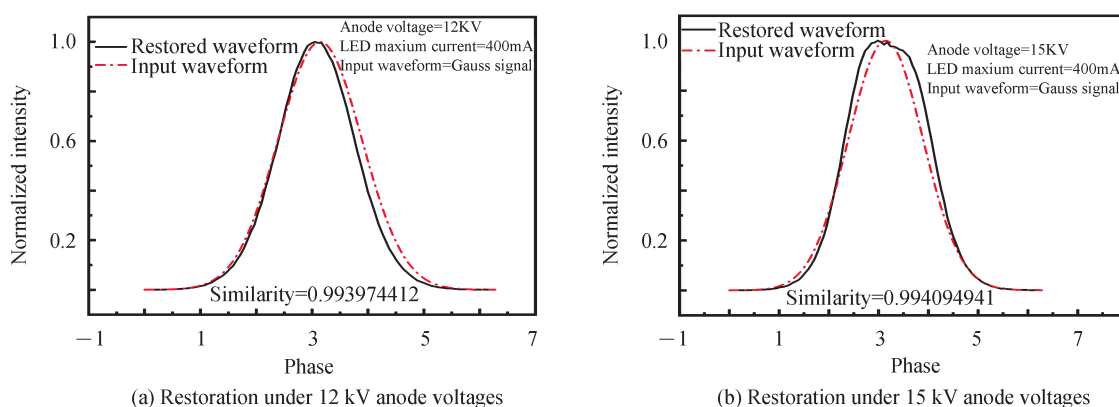


图11 不同阳极高压下高斯脉冲输入信号轮廓还原

Fig.11 Gaussian pulse contour restoration under different anode voltages

## 4 结论

通过高量子效率的S20阴极的选型、制备与相关光源的匹配、耦合设计,本文成功研制出一种基于光电阴极的超快响应脉冲X射线管。对比相关研究成果,本文中的光控X射线管最大管电流从之前报道的50  $\mu$ A提高到2.37 mA,后续通过优化设计能够实现更高的出射X射线光子数量和能量。同时,针对光控X射线管

易于调制的特性,实现了基于光控脉冲X射线管的数字信号和模拟信号的波形调制实验。信号传输实验表明,本文中的光控X射线管在出射X射线脉冲宽度、出射X射线强度均可以通过控制光源系统进行调整。下一步研究重点在于改进制备工艺,同时优化X射线管设计,提高出射X射线的能量与光子的数目,提升X射线管的调制性能,并且探索该光控脉冲X射线管在X射线通信和脉冲星导航地面验证系统中的应用。

#### 参考文献

- [1] YAFFE M, ROWLANDS J. X-ray detectors for digital radiography [J]. *Physics in Medicine & Biology*, 1997, 42(1): 1-39.
- [2] ZENTAI G. X-ray imaging for homeland security [J]. *International Journal of Signal and Imaging Systems Engineering*, 2010, 3(1): 13-20.
- [3] LU K, HE C, GUO N, et al. Low-dose X-ray radiotherapy-radiodynamic therapy via nanoscale metal-organic frameworks enhances checkpoint blockade immunotherapy [J]. *Nature Biomedical Engineering*, 2018, 2(8): 600-610.
- [4] GLASSER O. Wilhelm Conrad Röntgen and the early history of the Roentgen rays [M]. Norman Publishing, San Francisco, 1993.
- [5] ZHAO Basosheng, YAN Qiorong, SHENG Lizhi, et al. Grid-controlled X-ray source, space X-ray communication system and methods: China, CN103077874[P]. 2011-10-25  
赵宝升, 鄢秋荣, 盛立志, 等. 栅控X射线源、空间X射线通信系统及方法: 中国, CN103077874[P]. 2011-10-25.
- [6] GHOSH C, VARMA B. Preparation and study of properties of a few alkali antimonide photocathodes [J]. *Journal of Applied Physics*, 1978, 49(8): 4549-53.
- [7] JEONG J W, KANG J T, CHOI S, et al. A digital miniature x-ray tube with a high-density triode carbon nanotube field emitter [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(2): 023504.
- [8] JEONG J W, KIM J W, KANG J T, et al. A vacuum-sealed compact x-ray tube based on focused carbon nanotube field-emission electrons [J]. *Nanotechnology*, 2013, 24(8): 085201.
- [9] ANDRIYASH I, LEHE R, LIFSCHITZ A, et al. An ultracompact X-ray source based on a laser-plasma undulator [J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 1-6.
- [10] RYMELL L, BERGLUND M, HERTZ H. Debris-free single-line laser-plasma x-ray source for microscopy [J]. *Applied Physics Letters*, 1995, 66(20): 2625-2627.
- [11] AMANN J, BERG W, BLANK V, et al. Demonstration of self-seeding in a hard-X-ray free-electron laser [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(10): 693-698.
- [12] DERENZO S, MOSES W, BLANKESPOOR S, et al. Design of a pulsed x-ray system for fluorescent lifetime measurements with a timing accuracy of 109 ps[C]. *IEEE*, 1992.
- [13] BLANKESPOOR S, DERENZO S, MOSES W, et al. Characterization of a pulsed x-ray source for fluorescent lifetime measurements [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1994, 41(4): 698-702.
- [14] TIMOFEEV G, POTRAKHOV N. Pulsed X-ray source based on photo X-ray tube [J]. *MS&E*, 2018, 387(1): 012079.
- [15] TIMOFEEV G, POTRAKHOV N, NECHAEV A. Experimental research of the x-ray communication system[C]. AIP Publishing LLC, 2019.
- [16] LANGER K D, VUČIĆ J, KOTTKE C, et al. Exploring the potentials of optical-wireless communication using white LEDs[C]. *IEEE*, 2011.