

基于超快激光调制的纳秒脉冲 X 射线发射源*

李昀¹⁾²⁾ 苏桐^{1)†} 盛立志¹⁾ 张蕊利¹⁾ 刘舵³⁾

刘永安¹⁾ 强鹏飞¹⁾ 杨向辉¹⁾ 许泽方¹⁾²⁾

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)

3) (邯郸学院数理学院, 邯郸 056005)

(2023 年 9 月 15 日收到; 2023 年 10 月 30 日收到修改稿)

面向基础科学与空间应用研究领域对小型化超快脉冲 X 射线发射源的需求, 设计并研制了基于激光调制光源与光电阴极 X 射线管的超快脉冲 X 射线发生器, 解决了传统 X 射线调制发射装置重复频率低、时间稳定性差、脉冲特性差等应用难题. 本文主要开展了脉冲 X 射线发生器的超快调制控制模块研究, 并利用基于预调制的激光控制光源实现了高时间精度、高时间稳定度的超快时变光子信号以及纳秒脉冲 X 射线产生. 理论方面, 建立了脉冲 X 射线发生器时间响应模型, 分析了出射脉冲 X 射线的时域时间特性. 实验方面, 搭建了基于超快闪烁体探测器的脉冲 X 射线时间特性实验测试系统, 测试了激光控制光源及脉冲 X 射线发射源的时间特性参数. 实验结果表明脉冲 X 射线发生器可同时实现高重复 (12.5 MHz)、超快脉冲 (4 ns)、高时间稳定度 (400 ps) 特性, 且与所建立的理论模型高度符合. 相比于传统 X 射线调制方案, 脉冲时间参数指标得到了大幅提升、应用场景获得了极大拓展, 本项研究有望为实现超高时间稳定性、超快脉冲 X 射线发射源提供新思路.

关键词: 脉冲 X 射线发生器, 光电阴极 X 射线管, 激光控制光源, 超快闪烁体探测器

PACS: 07.85.Fv, 41.50.+h, 84.30.Qi

DOI: 10.7498/aps.73.20231505

1 引言

超快光子是面向极端尺度与极端时间的新型研究领域, 其中脉冲 X 射线调制发射源在材料科学、瞬时成像^[1]和 X 射线通信等领域具有广泛应用. 例如, 闪烁体材料的时间特性标定需要发射源产生脉冲宽度小于材料荧光衰减时间的脉冲 X 射线; 高速运动物体的瞬时成像需要曝光时间短、束流强度大的 X 射线; 脉冲星导航的地面验证实验中需要高时间稳定度的任意波形 X 射线发生装置^[2]. 这些应用场合都对调制 X 射线源的脉冲特性, 时

间特性, 以及频率特性提出了迫切需求.

传统的脉冲 X 射线发生装置可分为外调制, 内调制和闪光式三种. 其中, 外调制利用高速旋转的斩波器产生特定时域轮廓的 X 射线, 但斩波后 X 射线边缘模糊, 时间稳定性极差 (ms 量级)^[3]. 以栅控 X 射线发射源为代表的内调制方式, 通过在阳极和阴极之间增加栅极控制电子的加速过程实现对 X 射线的强度调制, 但栅控电压的建立时间限制了脉冲宽度^[4,5]. 闪光式 X 射线发射源基于短时间产生高强度脉冲电子束的方式, 可以实现亚纳秒脉冲宽度的 X 射线, 但其重复频率低、输出脉冲宽度变化大 (变化范围在几纳秒内)、时间精度差^[6],

* 国家自然科学基金 (批准号: 62271483) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: sutong@opt.ac.cn

应用场景受限. 因此, 传统的 X 射线调制发射源因为调制方式的固有缺陷^[7-9], 难以产生同时具备超快脉冲、高精度时间特性的脉冲 X 射线, 这也极大限制了 X 射线脉冲发射源的应用及相关领域的进展^[10].

本文提出了基于激光控制光源与光电阴极 X 射线管的脉冲调制方案, 设计并研制了小型化脉冲 X 射线发生器, 搭建了基于超快闪烁体探测器的脉冲 X 射线时间特性实验测试系统. 测试结果显示, 该脉冲 X 射线发生器具备 12.5 MHz 的高重频、4 ns 的超快脉冲和 400 ps 的高时间稳定度的优越时间特性.

2 方案设计与理论模型

2.1 脉冲 X 射线发生器原理

图 1 给出了脉冲 X 射线发生器的工作原理, 该发生器主要由两部分组成: 激光控制光源和光电阴极 X 射线管. 其中, 激光控制光源的主要功能是提供高时间精度的时变光子信号, 以激发电阴极并启动 X 射线的发生. 光电阴极 X 射线管是一种由 S20 光电阴极、金属阳极、电子光学元件组成, 高度精密的真空 X 射线发生装置^[11,12]. 其核心在于采用蒸镀技术, 在光电阴极 X 射线管的光学元件上沉积了 Na, Sb, K, Cs 四种金属制备而成的 S20 光电阴极. 这种多碱阴极能够将一定波长范围的时变光子信号转化为时变电子脉冲. 时变电子脉冲通过阳极高压和电子光学元件的共同作用, 高度聚焦和加速, 最终实现了电子束与金属阳极的精确碰撞, 从而产生时变脉冲 X 射线.

2.2 激光控制光源设计

传统的激光调制电路通常采用直接调制的方法, 但这种方法在高速通信或高精度应用中会导致

调制信号的高频失真以及信号畸变. 本文设计了基于预调制的激光控制光源, 通过复杂的电控系统来为激光二极管提供稳定的脉冲电流输出, 从而实现高带宽和低失真的时变光子信号输出. 图 2 为激光控制光源模块的设计图, 通过仿真电路的拓扑结构, 合理布局来保证激光的调制精度. 六路并联的调制放大电路为激光二极管提供了其额定输出功率. 同时, 考虑到 X 射线发生器的输运匹配关系, 选择了波长为 468—478 nm 的激光光源来匹配 S20 光电阴极, 使得 S20 光电阴极的量子效率能够达到 10%—15%, 表 1 为激光控制光源的特性参数表.

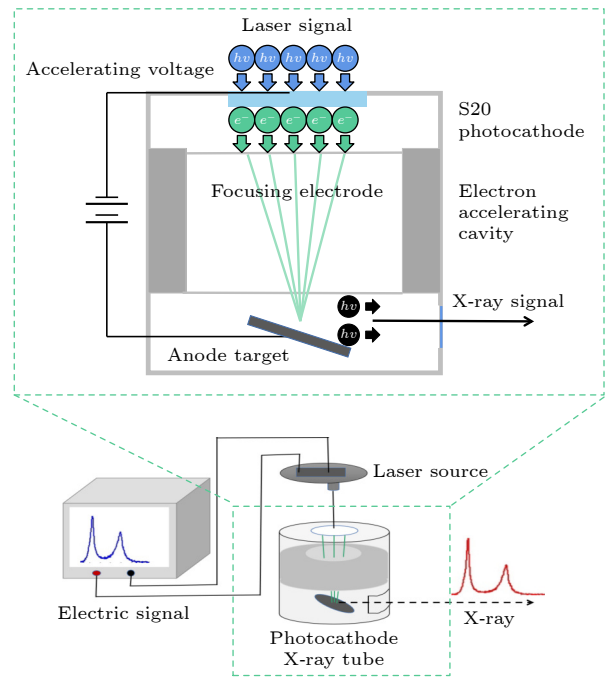


图 1 脉冲 X 射线发生器的原理图
Fig. 1. Schematic diagram of pulsed X-ray generator.

2.3 脉冲 X 射线发生器时间特性

图 3 给出了脉冲 X 射线发生器的时域分析结果^[13,14], 可知脉冲 X 射线发生器的时间特性由

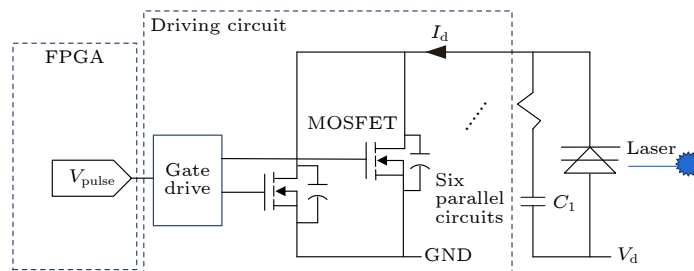


图 2 激光控制光源的设计图
Fig. 2. Design diagram of laser controlled light source.

表 1 激光控制光源的特性参数

Table 1. Characteristics of laser controlled light source.

Properties	Parameters
Emission wavelength/nm	468—478
Rated power/mW	3600
Optical output power/mW	1200
Response time/ns	1.8
Pulse repetition rate	DC to MHz
Divergence angle/(°)	12
Timing pulse jitter t_j /ps	± 70

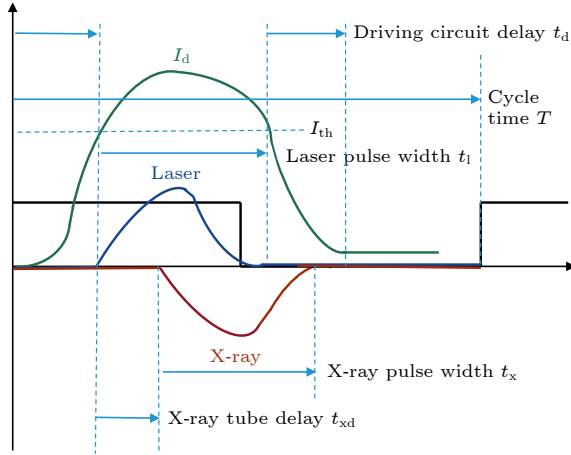


图 3 脉冲 X 射线发生器对短脉冲的时间响应曲线

Fig. 3. Time response curve of pulsed X-ray generator to short pulse.

激光控制光源的电路延时、激光脉冲宽度、光电阴极 X 射线管的延时等因素综合决定. 其中, 激光控制光源的电路延时主要产生于脉冲的上升沿和下降沿 [15,16], 激光脉冲信号的非线性问题源于激光二极管的阈值电流特性. 光电阴极 X 射线管光子到电子再到 X 射线的过程中存在的延时 t_{xd} . t_{xd} 可以用光子击中光电阴极表面引发光电发射的时间延迟以及光电阴极 X 射线管中电子的渡越时间来表示:

$$t_{xd} = t_{cd} + \int \frac{dz}{\sqrt{2\eta[V(z) + \varepsilon_{z0}]}}. \quad (1)$$

这里, $V(z)$ 为电子轴向的电位, η 为电子的荷质比, 电子初始能量 $E_{z0} = e\varepsilon_{z0}$, ε_{z0} 表示电子的初始电位, (1) 式描述了光电阴极 X 射线管的延时, 通过仿真计算可得光电阴极 X 射线管引发的延时在 6.916—4.271 ns 之间.

2.3.1 最高重复频率

从时域上分析, 脉冲 X 射线发生器的最短周

期主要受激光控制光源的限制, 可以表示为

$$T_{\min} = t_d + \tau_d, \quad (2)$$

其中 t_d 是激光控制光源的电路延时; τ_d 是激光二极管的最短脉冲宽度. 使用开关电路等效模型对激光控制光源的开关延时进行分析, 可以得到:

$$\begin{aligned} t_d &= t_{CL} + t_{on} + t_{off} \\ &= 2\pi\sqrt{LC} + RC_1 \ln\left(1 + \frac{V_d}{V_d - V_0}\right) \\ &\quad + RC_1 \ln\left(1 + \frac{V_d}{V_d - V_0}\right). \end{aligned} \quad (3)$$

这里, t_{CL} 是电流在电路中的振荡和反应的时间, t_{on} 是调制放大电路从关闭到打开的时间. t_{off} 是调制放大电路从导通到关闭的时间, L , C , R 是驱动电路的等效电感、等效电容、等效电阻, C_1 是与激光二极管并联的电容, V_d 为激光二极管供电电压, V_0 为驱动电路初始电压. 为求激光二极管最短脉冲宽度, 将激光二极管转化为等效电路, 可得:

$$\tau_d = \frac{2\pi L_{ld}}{V_d} \cdot \frac{R_{ld} + \sqrt{R_{ld}^2 + \left(\frac{L_{ld}}{C_{ld}}\right)^2}}{R_{ld}^2 + \left(\frac{L_{ld}}{C_{ld}}\right)^2}, \quad (4)$$

其中 τ_d 是激光二极管最短脉冲宽度; L_{ld} , C_{ld} , R_{ld} 是激光二极管的等效电感、等效电容、等效电阻; V_d 是供电电压. 由脉冲 X 射线发生器的最短周期可以得到最高重复频率为

$$f_{\max} = \frac{1}{T_{\min}} = \frac{1}{t_d + \tau_d}. \quad (5)$$

脉冲 X 射线发生器的最大调制频率由激光控制光源的电路延时以及激光二极管最短脉冲宽度共同决定. 由 (5) 式可以估算出激光控制光源的最大调制频率约为 88.47 MHz, 该值代表了理论上系统可以达到的最高调制频率.

2.3.2 时间弥散

图 4 为脉冲 X 射线发生器的时间弥散曲线, 脉冲 X 射线发生器的时间弥散来源于激光控制光源与光电阴极 X 射线管的共同作用 [17-19]. 激光控制光源采用六路并联的调制放大电路, 由于电路板中的元器件参数、布局和线路长度等因素的不确定性, 导致六路电信号到达激光二极管的时间存在差异, 引起出射的激光脉冲的时间弥散现象, 光电阴极 X 射线管的时间弥散效应包括多个方面的影响

因素^[20]. 首先, 电子在光电阴极上释放的位置不同, 初速度也有所不同. 其次, 在电子传输过程中, 这些电子在束流中会经历不同的运动轨迹和聚焦效应. 这一系列因素会导致电子到达靶材的时间存在差异, 进而对出射的 X 射线的时散产生影响.

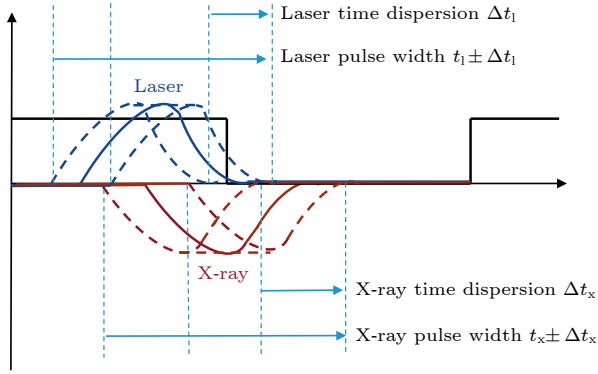


图 4 脉冲 X 射线发生器的时间弥散曲线

Fig. 4. Time dispersion curve of pulsed X-ray generator.

由电路引起的时间弥散是典型的随机过程, 利用高斯分布来建模描述激光控制光源的时间弥散:

$$g_1(t) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-(t-\mu_1)^2/(2\sigma_1^2)}. \quad (6)$$

这里, $g_1(t)$ 表示电路响应的幅度, μ_1 表示激光控制光源时间弥散的均值, σ_1 表示激光控制光源时间弥散的标准差. 可使用基于高斯分布的展宽公式来计算这种高斯分布的标准差:

$$\sigma_1 = \frac{t_1}{2\sqrt{2 \times \ln(2)}}. \quad (7)$$

式中, t_1 是激光控制光源时间弥散高斯分布的半高宽. 可以得到时间弥散对出射的时变光子信号的重复频率影响:

$$f = \frac{1}{T} \pm \frac{\sigma_1}{T^2}. \quad (8)$$

当时间弥散的标准差增大时, 重复频率的变化量也会增大, 时变光子信号的时间间隔会变得更加不稳定, 这种不稳定性对激光控制光源的高度精确时间同步产生负面影响. 而脉冲 X 射线发生器出射的 X 射线重复频率受激光控制光源的重复频率限制, 因此光电阴极 X 射线管产生的时间弥散虽然不会直接影响 X 射线的重复频率, 但会间接影响系统整体的时序精度.

光电阴极 X 射线管中电子从光电阴极释放时, 释放位置和初速度的分布导致到达时间的差异, 这可视为一个随机过程; 同样, 电子在传输过程中受

外部力和聚焦效应的影响导致的时间差异, 也可视为随机过程. 这两种时间弥散的分布都可以用高斯分布来建模. 最终脉冲 X 射线发生器的时间弥散的分布将是多种高斯分布的卷积, 可表示为

$$g(t) = \frac{1}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2} \sqrt{2\pi}} \times \exp\left\{-\frac{[t - (\mu_1 + \mu_2 + \mu_3)]^2}{2(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2)}\right\}. \quad (9)$$

其中, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 是多种时间弥散分布的标准差, μ_1, μ_2, μ_3 是多种时间弥散分布的均值. 得到脉冲 X 射线发生器的时间弥散分布为新的高斯分布.

3 实验系统及测量结果分析

3.1 激光控制光源的重复频率测试

为了测试激光控制光源的时间特性, 选用时间精度为 ps 量级、上升时间为 500 ps、探测波段为 320—900 nm 的 MPPC 探测器来接收激光控制光源产生的时变光子信号, 并利用示波器观察 MPPC 探测器的输出信号. 图 5 为激光控制光源在不同重复频率下由 MPPC 探测得到的输出光信号.

实验结果表明, 激光控制光源的调制速率能够达到 40 MHz. 实际调制速率未达到理论计算的最大值 88.47 MHz, 这是由于温度影响电路参数所导致的. 激光控制光源在持续稳定工作时, 激光二极管的电光转换效率为 33%, 大量电能被转化为热量, 从而引起温度的上升. 温度的上升导致激光控制光源的等效模型参数发生显著变化, 使激光控制光源的实际最高调制频率小于理论计算的最高调制频率. 通过示波器观察波形曲线, 可以观察到激光控制光源的电路延时、输出时变光子信号的非线性问题以及时间弥散现象, 这与之前对激光控制光源时间特性的理论分析相一致. 在实现 40 MHz 调制时, 由于频率过高, 信号在传输过程中受到衰减, 导致信号强度减小, 波形出现一定程度的失真. 通过对时间精度的测试, 得到激光控制光源的时间延时为 19.89 ns, 时变光子信号的时间弥散高斯分布的半高宽为 70 ps, 时间弥散高斯分布的标准差为 17.15 ps. 时间弥散效应会导致轻微的重复频率波动, 当重复频率为 1 MHz 时, 波动范围为 1 MHz \pm 17.15 Hz; 而当重复频率增加到 40 MHz 时, 波动范围扩大到 40 MHz \pm 27.44 kHz. 在较低的调制频率下, 波动的量级相对较小.

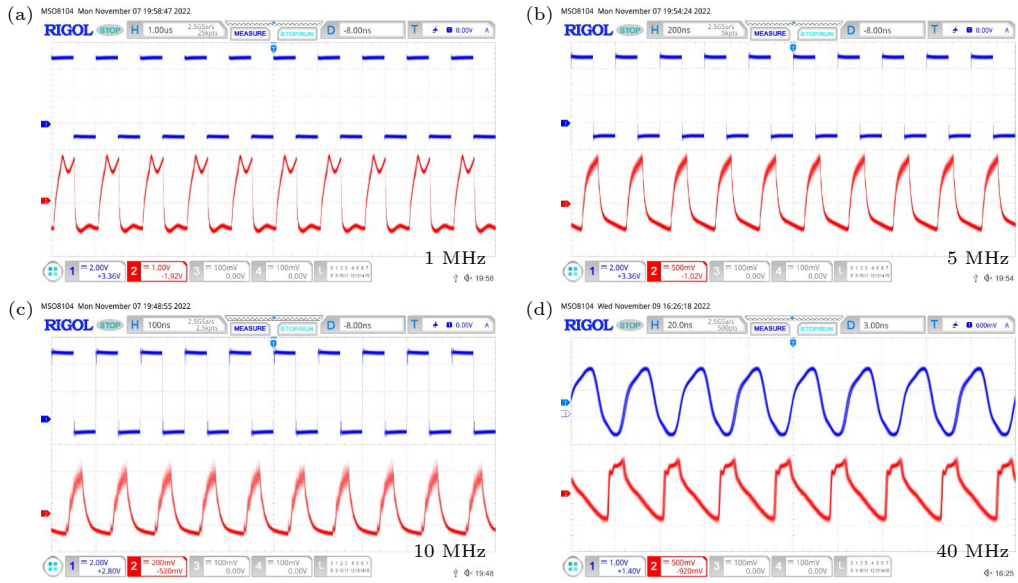


图 5 不同重复频率下激光控制光源的输出光信号 (蓝色为输入电信号, 红色为 MPPC 探测器接收到的光信号) (a) 1 MHz; (b) 5 MHz; (c) 10 MHz; (d) 40 MHz

Fig. 5. Light signals of LD light source at different modulation rates under different modulation frequencies (Blue is the input electrical signal, red is the light signal received by the MPPC detector): (a) 1 MHz; (b) 5 MHz; (c) 10 MHz; (d) 40 MHz.

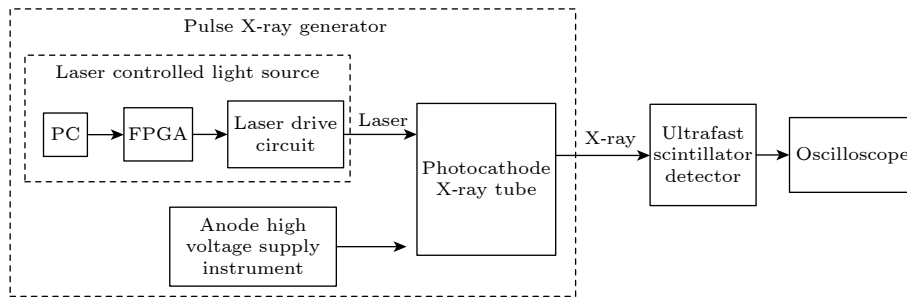


图 6 基于超快闪烁体探测器的脉冲 X 射线时间特性实验测试系统

Fig. 6. Experimental testing system for pulsed X-ray time characteristics based on ultrafast scintillator detector.

3.2 脉冲 X 射线发生器的重复频率测试

该测试模块是对脉冲 X 射线发生器出射的时变 X 射线的重复频率进行测试. 考虑到出射的 X 射线具有极窄的脉冲特性, 需要在极短的时间尺度内测试和分析 X 射线的时间特性, 选用超快闪烁体探测器. 该探测器由荧光衰减时间为 900 ps 的 BaF₂ 晶体与光电倍增管相结合, 可以有效地输出负值信号. 这种荧光衰减时间为 900 ps 的 BaF₂ 晶体虽然具备良好的时间特性, 但 BaF₂ 在 30 keV 能量处荧光光子产生效率相对较低. 脉冲 X 射线时间特性实验测试系统如图 6 所示.

由于激光控制光源在提高重复频率的过程中, 重复频率的稳定性会降低. 为确保激光控制光源提供稳定的重复频率, 选用重复频率为 12.5 MHz, 波

动范围为 $12.5 \text{ MHz} \pm 2.7 \text{ kHz}$ 的激光光源, 在阳极高压为 30 kV 时, 得到脉冲 X 射线的重复频率测试结果如图 7 所示.

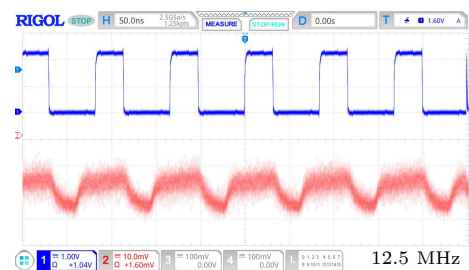


图 7 重复频率为 12.5 MHz 的实验结果图 (蓝色为输入电信号, 红色为超快闪烁体探测器得到的 X 射线信号)

Fig. 7. Experimental results with a modulation frequency of 12.5 MHz (Blue is the input electrical signal, red is the X-ray signal from scintillator detection).

由测试结果可知, 脉冲 X 射线发生器的重复频率能够达到 12.5 MHz, 脉冲 X 射线时间测试系统的时间延时为 28.76 ns. 脉冲 X 射线信号的重复频率表现相对稳定, 在接近 12.5 MHz 的范围内存在轻微波动. 脉冲 X 射线发生器出射的 X 射线脉冲波形与激光控制光源出射的激光脉冲波形相似, 两种脉冲有着同步性, 相对延时为 8.87 ns, 这与之前对光电阴极 X 射线管的延时计算相近, 理论分析相一致.

3.3 脉冲 X 射线发生器的最短脉冲宽度测试

该测试模块是对脉冲 X 射线发生器出射的时变脉冲 X 射线的最窄脉冲宽度进行测试. 通过调整激光控制光源的输出脉冲宽度, 并保持阳极高压为 30 kV, 进行脉冲 X 射线的最短脉冲宽度测试, 测试结果如图 8 所示.

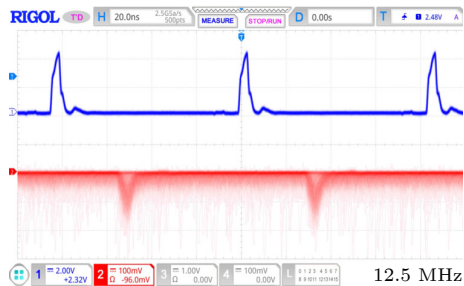


图 8 脉冲宽度为 4 ns 的实验结果图 (蓝色为输入电信号, 红色为超快闪烁体探测器得到的 X 射线信号)

Fig. 8. Experimental results with a pulse width of 4 ns (Blue is the input electrical signal, red is the X-ray signal from scintillator detection).

由于 BaF₂ 闪烁体在 30 keV 能量处荧光光子产生效率较低, 示波器上出现了信号脉冲与本底噪声脉冲高度相近、但在一定的积分时间内信号出现次数明显更多的情况. 由测试结果可知, 4 ns 的脉冲宽度为脉冲 X 射线发生器的性能极限. 结合理论分析, 脉冲 X 射线的时间弥散遵循高斯分布. 使用商用 TDC 对时间精度进行测试, 可以得到脉冲 X 射线发生器引起的时间弥散高斯分布的半高宽为 400 ps, 时间弥散高斯分布的标准差为 98 ps.

对出射 X 射线信号的传输质量进行验证. 设置脉冲 X 射线发生器的重复频率为 12.5 MHz、脉冲宽度为 32 ns, 通过单位面积的半导体探测器在一定距离下进行探测和耦合可得 X 射线的输出功率为 7.84×10^{-4} W, 总噪声功率为 5.46×10^{-7} W, 信噪比大于 22.19 dB. 这一高信噪比表明脉冲 X 射线发生器产生的 X 射线信号具有出色的清晰度和质量.

4 结 论

本文研制了一种新型脉冲 X 射线发生器, 该发生器结合了激光控制光源和光电阴极技术. 该项技术克服了传统装置在重复频率、时间稳定性和脉冲特性等方面的限制. 脉冲 X 射线发生器能在 12.5 MHz 的高重复频率下, 展现出了超快的脉冲宽度 (4 ns) 和卓越的时间稳定度 (400 ps). 这些时间特性使其在时间精确度要求极高的应用中表现出色, 例如材料荧光衰减时间标定、高速运动物体瞬时成像、X 射线通信等. 同时将进一步优化该装置的性能, 提高重复频率和时间精度, 以满足更广泛的应用需求.

参考文献

- [1] Hu H J 2012 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [胡慧君 2012 博士学位论文 (北京: 中国科学院大学)]
- [2] Xu N, Sheng L Z, Zhang D P, Chen C, Zhao B S, Zheng W, Liu C L 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 059701 (in Chinese) [徐能, 盛立志, 张大鹏, 陈琛, 赵宝升, 郑伟, 刘纯亮 2017 物理学报 **66** 059701]
- [3] Zhao B S, Su T, Sheng L Z 2016 *Introduction to Space X-ray Communication* (Beijing: Science Press) p114 (in Chinese) [赵宝升, 苏桐, 盛立志 2016 空间 X 射线通信概论 (北京: 科学出版社) 第 114 页]
- [4] Tang T, Xu J, Wang X, Mu B Z 2019 *Opt. Instrum.* **41** 76 (in Chinese) [唐添, 徐捷, 王新, 穆宝忠 2019 光学仪器 **41** 76]
- [5] Zhao B, Yan Q, Sheng L, Liu Y 2017 US Patent 9 577 766 B2
- [6] Xiao F, Zhao B S, Sheng L Z, Liu Y A, Liu D, Deng N L 2014 *Acta Phys. Sin.* **16** 160701 (in Chinese) [马晓飞, 赵宝升, 盛立志, 刘永安, 刘舵, 邓宁勤 2014 物理学报 **16** 160701]
- [7] Quan L, Tu J, Fan Y J, Liu Y H, Zhang Y M, Zhou J S, Liu S, Ma Y L, Zhang J H, Li D 2007 *High Power Laser Part Beams* **19** 1049 (in Chinese) [全林, 屠荆, 樊亚军, 刘月恒, 张永民, 周金山, 刘胜, 马彦良, 张继红, 李达 2007 强激光与粒子束 **19** 1049]
- [8] Blankespoor S, Derenzo S, Moses W, Rossington C, Ito M, Oba K 1994 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **41** 698
- [9] Derenzo S, Moses W, Blankespoor S, Ito M, Oba K 1992 *IEEE Conference on Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Orlando, the United States, October 25-31, 1992* p37
- [10] Gopal L, Sim M L 2008 *6th National Conference on Telecommunication Technologies and 2nd Malaysia Conference on Photonics Putrajaya, Malaysia, August 26-28, 2008* p304
- [11] Timofeev G, Potrakhov N 2018 *5th International Conference on X-ray, Electrovacuum and Biomedical Technique St. Petersburg, Russia, November 29-30, 2018* p020020
- [12] An Y Y, Liu J F 2016 *Optoelectronic Technology* (Beijing: Electronic Industry Press) p236 (in Chinese) [安毓英, 刘继芳 2016 光电子技术 (北京: 电子工业出版社) 第 236 页]
- [13] Xuan H, Liu Y A, Qiang P F, Su T, Yang X H, Sheng L Z 2021 *Chin. Phys. B* **30** 118502
- [14] Li Y, Su T, Sheng L Z, Qiang P F, Xu N, Li L S, Zhao B S

- 2017 *Acta Photon. Sin.* **46** 1106002 (in Chinese) [李瑶, 苏桐, 盛立志, 强鹏飞, 徐能, 李林森, 赵宝升 2017 *光子学报* **46** 1106002]
- [15] Li Y, Su T, Shi F, Sheng L Z, Qiang P F, Zhao B S 2018 *Infrared Laser Eng.* **47** 622001 (in Chinese) [李瑶, 苏桐, 石峰, 盛立志, 强鹏飞, 赵宝升 2018 *红外与激光工程* **47** 622001]
- [16] Liu C Y, Wu C C, Tang L C, Cheng W H, Chang E Y, Peng C Y, Kuo H C 2022 *Photonics* **9** 652
- [17] Wang L Q, Su T, Zhao B S, Sheng L Z, Liu Y A, Liu D 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 120701 (in Chinese) [王律强, 苏桐, 赵宝升, 盛立志, 刘永安, 刘舵 2015 *物理学报* **64** 120701]
- [18] David R, Allard B, Branca X, Joubert C 2021 *Microelectron. J.* **113** 105056
- [19] Dawood A A, Mansour T S, Mohammed L T 2019 *Iraqi Laser J.* **18** 27
- [20] Yaffe M, Rowlands J 1997 *Phys. Med. Biol.* **42** 1

Nanosecond pulse X-ray emission source based on ultrafast laser modulation*

Li Yun¹⁾²⁾ Su Tong^{1)†} Sheng Li-Zhi¹⁾ Zhang Rui-Li¹⁾ Liu Duo³⁾

Liu Yong-An¹⁾ Qiang Peng-Fei¹⁾ Yang Xiang-Hui¹⁾ Xu Ze-Fang¹⁾²⁾

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

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

3) (School of Mathematics and Physics, Handan University, Handan 056005, China)

(Received 15 September 2023; revised manuscript received 30 October 2023)

Abstract

In response to the growing demand for miniaturized ultrafast pulsed X-ray sources in the fields of fundamental science and space applications, we design and develop an ultrafast pulsed X-ray generator based on a laser-modulated light source and a photoelectric cathode. This innovative technology addresses the limitations commonly encountered in traditional X-ray emission devices, such as low repetition rate, insufficient time stability, and suboptimal pulse characteristics.

Our effort is to study and develop the ultrafast modulation control module for the pulsed X-ray generator. This effort results in achieving high levels of time accuracy and stability in ultrafast time-varying photon signals. Moreover, we successfully generate nanosecond pulsed X-rays by using a laser-controlled light source.

Theoretically, we establish a comprehensive time response model for the pulsed X-ray generator in response to short pulses. This includes a thorough analysis of the time characteristics of the emitted pulsed X-rays in the time domain. Experimentally, we conduct a series of tests related to various time-related parameters of the laser-controlled light source. Additionally, we design and implement an experimental test system for assessing the time characteristics of pulsed X-rays, by using an ultrafast scintillation detector.

The experimental results clearly demonstrate that our pulsed X-ray generator achieves impressive capabilities, including high repetition rates (12.5 MHz), ultrafast pulses (4 ns), and exceptional time stability (400 ps) in X-ray emission. These results closely align with our established theoretical model. Compared with traditional modulation techniques, our system exhibits significant improvement in pulse time parameters, thereby greatly expanding its potential applications.

This research provides a valuable insight into achieving ultra-high time stability and ultrafast pulsed X-ray emission sources. These advances will further enhance the capabilities of X-ray technology for scientific research and space applications.

Keywords: pulsed X-ray generator, photoelectric cathode X-ray tube, laser-controlled light source, ultrafast scintillation detector

PACS: 07.85.Fv, 41.50.+h, 84.30.Qj

DOI: 10.7498/aps.73.20231505

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62271483).

† Corresponding author. E-mail: sutong@opt.ac.cn



基于超快激光调制的纳秒脉冲X射线发射源

李昀 苏桐 盛立志 张蕊利 刘舵 刘永安 强鹏飞 杨向辉 许泽方

Nanosecond pulse X-ray emission source based on ultrafast laser modulation

Li Yun Su Tong Sheng Li-Zhi Zhang Rui-Li Liu Duo Liu Yong-An Qiang Peng-Fei Yang Xiang-Hui Xu Ze-Fang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 040701 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231505

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231505>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于ZnO:In纳米棒阵列的X射线闪烁转换屏制备与性能研究

Preparation and properties for X-ray scintillation screen based on ZnO:In nanorod arrays

物理学报. 2020, 69(10): 102902 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200282>

强场X射线激光物理

High field X-ray laser physics

物理学报. 2021, 70(8): 084101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210096>

一种聚焦型X射线探测器在轨性能标定方法

A method of calibrating effective area of focusing X-ray detector by using normal spectrum of Crab pulsar

物理学报. 2018, 67(5): 050701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172352>

脉冲硬X射线能注量测量技术

Energy fluence measurement for pulse hard X-ray

物理学报. 2020, 69(14): 145202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191700>

面向先进光源线站等大科学装置的低温X射线能谱仪原理及应用进展

Development of basic theory and application of cryogenic X-ray spectrometer in light sources and X-ray satellite

物理学报. 2021, 70(18): 180702 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210350>

双阴极X射线条纹相机变像管

X-ray streak camera tube with two photocathodes

物理学报. 2022, 71(23): 233201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221194>