

时间弥散补偿型低噪声高时间分辨 X 射线成像器件设计*

田丽萍¹⁾ 杨阳²⁾ 冯鹏辉²⁾ 陈琳¹⁾ 薛彦华²⁾ 张翔¹⁾
沈令斌¹⁾ 田进寿²⁾ 缙永胜^{2)†}

1) (金陵科技学院网络与通信工程学院, 南京 211169)

2) (中国科学院西安光学精密机械研究所, 超快光科学与技术全国重点实验室, 西安 710119)

(2025 年 12 月 6 日收到; 2026 年 1 月 12 日收到修改稿)

大型激光装置、高能离子束装置等大科学装置在产生高能量密度物质的同时, 会伴随产生 X 射线及高能伽马及中子辐射, 高能伽马及中子辐射噪声与 X 射线信号同时空分布, 会引起电子二次辐射和相关效应, 降低 X 射线成像器件的信噪比. 本研究基于 $\pm 90^\circ$ 弯曲结构的电子束导引管, 提出并设计了一种时间弥散补偿型低噪声高时间分辨 X 射线探测成像器件, 采用 $+90^\circ$ 弯曲结构电子束导引管滤除高能伽马及中子噪声, 提高成像器件的信噪比; 结合 -90° 弯曲结构电子束导引管能够有效补偿 $+90^\circ$ 弯曲结构电子束导引管引起的时间弥散, 提升光阴极不同位置发射电子束的时间展宽均匀性; 合理设置 MCP 成像器件与电子束导引管出口的距离, 可便捷控制成像器件的空间放大倍率. 在微通道板 (microchannel plate, MCP) 像增强器工作电压为 800 V 时, 可实现 2 ps 的极限时间分辨率; 此外, MCP 不同工作电压 (700—1000 V) 下, 均可实现对 5 ps 时间间隔的光电子的有效分辨. 最终, 此设计方法能够有效避免高能伽马及中子噪声对 X 射线成像器件的影响, 且实现优于 5 ps 的时间分辨率.

关键词: $\pm 90^\circ$ 弯曲结构电子束导引管, 高能伽马及中子噪声, X 射线成像器件

DOI: 10.7498/aps.75.20251680

CSTR: 32037.14.aps.75.20251680

1 引言

惯性约束核聚变过程不仅伴随能量较低的可见光或 X 光信号辐射, 同时伴随有高能伽马和中子信号. 由于伽马和中子信号能量较高且具有很强穿透特性, 且少部分高能辐射的伽马射线照射也会产生电子噪声, 因此采用传统微通道板型成像器件对可见光或 X 射线信号进行测量时容易受到高能信号干扰. 以脉冲调制型光电倍增管 (PD-PMT) 为核心的成像器件具有超高的时间分辨率, 可广泛

应用于惯性约束核聚变、高能密度物质的快速诊断中, 实现对可见光或 X 光信号的精密测量^[1-3]. 自首台 PD-PMT 研制成功以来, 许多科学家在提升脉冲调制型管的时间展宽因子和光电倍增管的时间分辨率方面开展了大量理论及实验工作^[4-6]. 目前, 最大化脉冲调制管的时间展宽因子和降低光电倍增管的时间弥散是提升 PD-PMT 时间分辨率的主要途径^[7-9].

本文设计了一种具有时间弥散补偿能力的低噪声高时间分辨 X 射线成像器件. 通过分析其应用背景和工作原理, 设计并优化了一种新型的“S”型

* 国家自然科学基金青年科学基金项目 (C 类) (批准号: 12405246) 和国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目 (批准号: 12127810) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yshgou@163.com

电子束聚焦及导引结构, 该结构既可滤除强辐射背景中的高能伽马及中子背景, 也可对超快电子脉冲进行时域展宽. 结合 MCP 电子倍增器件, 通过调节 MCP 与电子束聚焦及导引结构之间的距离, 可方便实现不同的空间放大倍率; 通过调节光电阴极和加速栅极之间调制信号的斜率, 可实现 35—53 倍的电子脉冲时域展宽; 此外, 通过合理调节 MCP 倍增器件的工作电压, 可实现 10^4 的电子增益. 最后, 通过电子束流分析可知, 该低噪声高时间分辨 X 射线成像器件可实现优于 5 ps 的时间分辨率.

2 时间弥散补偿型低噪声 X 射线成像器件设计

2.1 设计理论

在设计低噪声 X 射线成像器件的过程中, 对高能伽马及中子噪声的过滤至关重要^[10-12]. 不带电的伽马及中子噪声在电磁环境中不受影响, 因此考虑采用弯曲结构的电子漂移管实现高能伽马及中子噪声和光电信号的物理分离; 但弯曲结构的漂移管中, 离轴不同距离处光电子的光程差不同, 会引起 X 射线成像器件光电阴极不同位置处的电子束时间展宽因子不同, 可采用反向弯曲结构补偿此

时间弥散. 此外, 传统 X 射线成像器件时间分辨率在纳秒至几十皮秒级别, 可结合脉冲调制技术和电子束漂移管实现光电子的时域展宽^[13]. 如此, 既可滤除高能伽马及中子噪声, 提高动态范围, 也可实现高时间分辨率.

2.2 时间弥散补偿型低噪声 X 射线成像器件结构设计

图 1(a) 为传统 X 射线成像器件结构, 阴极在响应 X 射线信号的同时, 能够响应伴随实验产生的高能伽马及中子噪声, X 射线成像器件上的阴极与 MCP 等组件本身就能对伽马及中子产生响应; 同时, 高能伽马及中子背景在与构成 X 射线成像器件的物质相互作用后将产生二次辐射和相关效应, 这些由伽马及中子产生的强背景和强噪声将不仅恶化 X 射线成像器件的信噪比, 还对 X 射线成像器件本身造成永久性的损害^[14,15]. 为解决上述问题, 本研究采用三维电磁仿真软件 CST Particle Studio 设计了一种具有 $\pm 90^\circ$ 弯曲电子束聚焦及导引互补结构的低噪声 X 射线成像器件, 如图 1(b) 所示. 该结构主要由光电阴极、加速电极、“S”型时间弥散补偿结构 (包括电子束输入聚焦及导引结构、电子束聚焦及导引结构、电子束缓冲聚焦及导引结构、时间弥散补偿型电子束聚焦及导引结构、

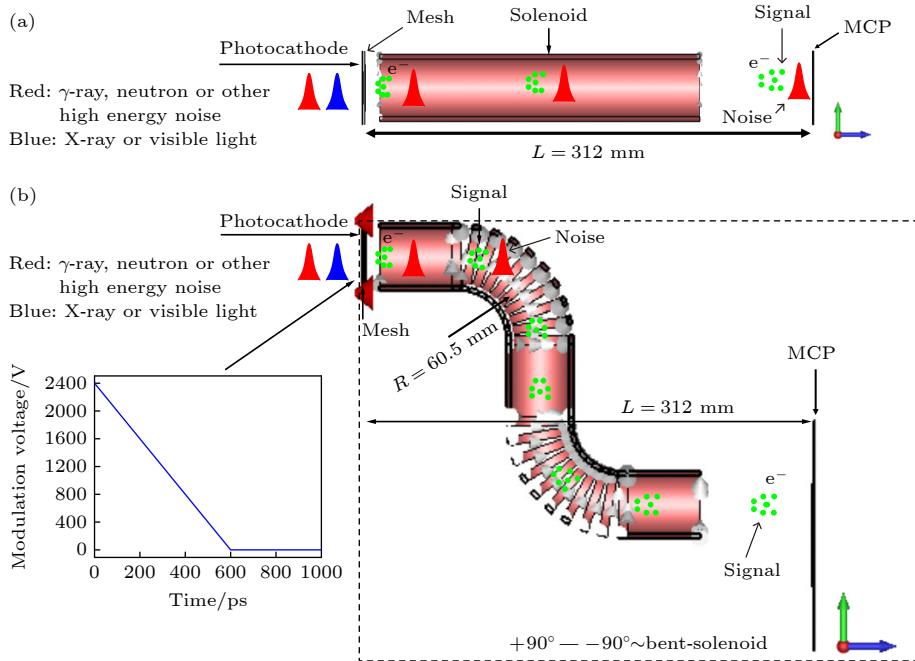


图 1 X 射线成像器件 (a) 传统 X 射线成像器件; (b) 具有 $\pm 90^\circ$ 弯曲结构电子束聚焦及导引互补结构的低噪声 X 射线成像器件
Fig. 1. X-ray detector: (a) The traditional X-ray detector; (b) the low-noise X-ray detector with $\pm 90^\circ$ curved electron beams focusing and directing complementary structure.

电子束输出聚焦及导引结构) 及 MCP 电子倍增器件组成. 其中, 光电阴极及加速电极均为薄圆柱体结构且相互平行放置, 二者之间加载随时间变化的斜坡电压信号可对光电阴极产生的光电子信号进行时域调制; 电子束输入聚焦及导引结构、电子束缓冲聚焦及导引结构和电子束输出聚焦及导引结构三者均为空心螺线管结构, 且三者结构参数及电气参数完全相同; 电子束聚焦及导引结构为具有一定曲率半径的弯曲螺线管结构, 能够有效完成对高能伽马及高能中子的过滤, 将 X 射线产生的有用光电子信号输出至 MCP 成像器件; 时间弥散补偿型电子束聚焦及导引结构能够补偿光电子在电子束聚焦及导引结构中产生的光程差, 进而补偿光电子的渡越时间弥散, 提高器件的时间分辨率及空间分辨率; MCP 成像器件倍增光电子信号后进行输出.

时间弥散补偿型低噪声 X 射线成像器件的光电阴极与加速电极之间的距离为 1.5 mm, 阴栅加速场强为 467 V/mm, $\pm 90^\circ$ 弯曲的电子束聚焦及导引结构的线圈匝数设置为 2 N/mm, 绕线电流为 200 A, 电子束输入、缓冲及输出聚焦及导引结构螺线管的长度均为 200 mm, 线圈匝数为 2 N/mm.

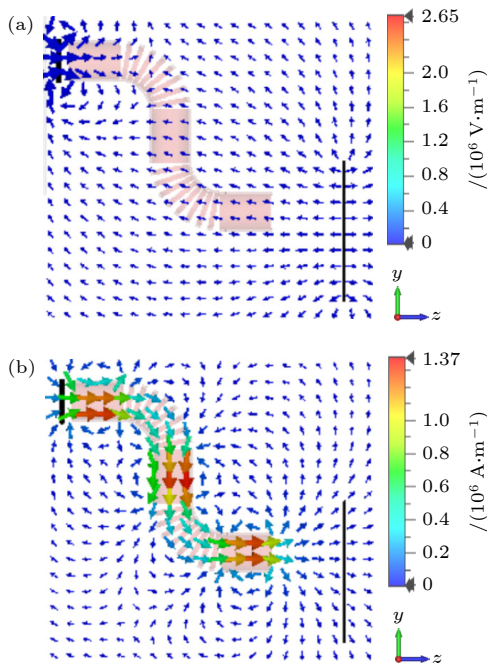


图 2 时间弥散补偿型低噪声 X 射线成像器件的电磁场分布 (a) 电场分布图; (b) 磁场分布图

Fig. 2. Electro-magnetic distribution of the low-noise X-ray imaging tube with time dispersion compensated: (a) Potential field distribution; (b) magnetic field distribution.

时间弥散补偿型低噪声 X 射线成像器件中不同离轴距离处的电场和磁场分布是通过有限积分法计算的, 如图 2 所示. 阴极和加速电极之间的强电场为光电子提供能量, 时间弥散补偿型低噪声 X 射线成像器件的 $\pm 90^\circ$ 弯曲螺线管结构的电势相互补偿, 既能聚焦光电子, 改变光电子信号的行进方向, 又能避免高能伽马及中子造成的大背景, 也可实现时间弥散补偿.

3 结果与讨论

3.1 时间展宽因子评估

时间弥散补偿型低噪声 X 射线成像器件实现高时间分辨的核心是通过在阴极-栅极之间施加随时间线性变化的调制脉冲信号, 将几个皮秒时间间隔的电子脉冲在时域展宽为几十皮秒的时间间隔. 因此, 评估 X 射线成像器件的时间展宽特性, 需要给阴极-栅极施加高线性度的斜坡时域调制信号. 在阴极-栅极边缘处定义两个对称放置的电压源离散端口, 如图 3(a) 红色箭头所示. 高线性度斜坡电压时域调制信号如图 3(b) 所示, 扫描信号斜率为 4 V/ps. 当入射 X 射线信号被光电阴极转化为光电子后进入阴极-栅极区域 (阴栅区), 由于阴栅区存在动态电场, 因此不同时刻进入阴栅区的电子受到的电场力不同. 对于如图 3(b) 所示的衰减型电场, 先出射的光电子受到的电场力大于后者, 因而其从栅极出射时速度大于后者. 光电子从栅极出射后进入零电场漂移区, 先进入漂移区的光电子速度

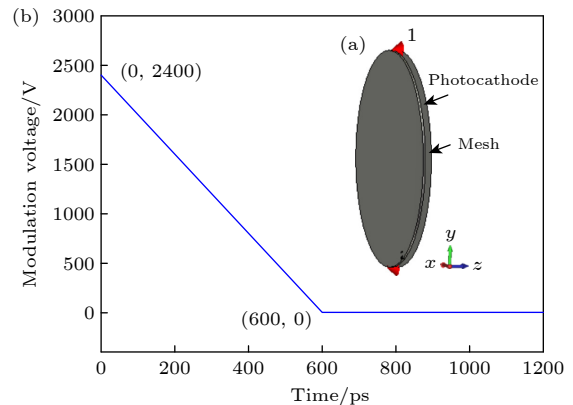


图 3 阴极-栅极之间的端口及调制信号设置 (a) 电压源离散端口; (b) 斜坡电压时域调制信号

Fig. 3. Ports and modulation signal settings in photocathode and mesh: (a) Discrete voltage ports; (b) ramp voltage in the time domain.

大于后者,随着电子的不断漂移,两束电子之间的间距会越来越大,最终实现光电子群的“时间展宽”,展宽后的光电子被 MCP 电子倍增器件成像,从而实现数皮秒时间分辨.当 MCP 电子倍增器件的时间分辨率给定时,时间调制因子 M 越大,器件时间分辨率越高.

为评估 X 射线成像器件的时间展宽情况,在光电阴极中心位置处发射两束半高全宽为 0.01 ps,间隔为 120 ps 的电子脉冲,分别追踪时间调制信号作用和未作用下的电子脉冲展宽情况,如图 4 所示.时间调制信号未作用时,在 MCP 探测屏输入端面处统计得到电子脉冲随时间分布情况,如图 4(a) 所示.可见,光电子信号经 $\pm 90^\circ$ 弯曲结构的电子束聚焦及导引结构之后,在时域未展宽,间隔依然为 120 ps.当斜率为 4 V/ps 的时间调制信号作用于光电阴极和加速栅极时,在 MCP 探测屏输入端面处统计得到归一化电子脉冲如图 4(b) 所示,电子脉冲时间间隔展宽至 6.08 ns.因此,此系统的时间调制因子 M 为 50.图 5 给出了不同时刻光电子束在 X 射线成像器件中的运行情况动态演示.

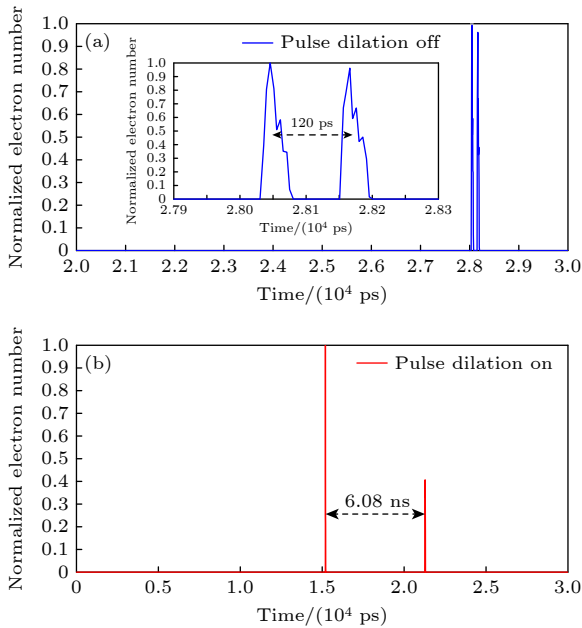


图 4 间隔 120 ps 的输入电子脉冲信号的展宽和未展宽的比较
Fig. 4. Comparison of stretched and unstretched input electronic pulse with time interval of 120 ps.

为研究不同斜率调制信号对光电子束的时间展宽情况及成像器件的时间展宽因子,在光电阴极和加速栅极之间施加斜率为 1—6 V/ps、持续时间为 600 ps 的斜坡电压调制信号,从光电阴极中心

$\Phi 16$ mm 的范围内发射时间间隔为 120 ps 的一定数量的电子,计算两束光电子脉冲由光电阴极运行至 MCP 输入端口处的时间展宽情况,如图 6 蓝色曲线所示.调制信号斜率越大,两束电子脉冲间隔越大,时间展宽效果越显著.图 6 红色曲线为 X 射线成像器件的时间展宽因子随调制信号斜率变化情况.同样,斜率越大,时间展宽因子越大.

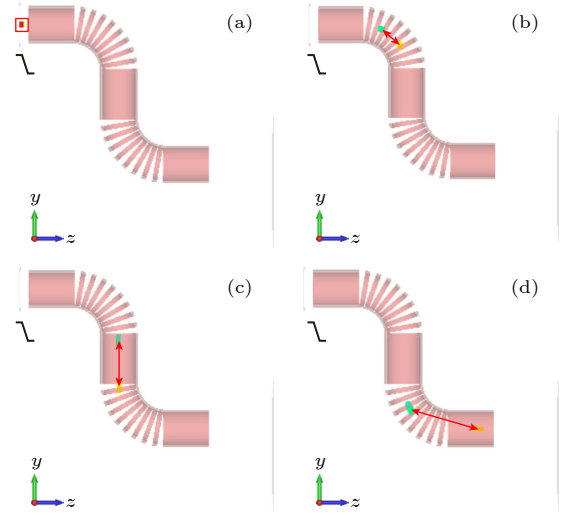


图 5 不同时刻的脉冲电子运行轨迹 (a) $t = 0.2$ ns; (b) $t = 5$ ns; (c) $t = 7.5$ ns; (d) $t = 11.5$ ns
Fig. 5. Trajectories of pulsed electrons at the different instant time: (a) $t = 0.2$ ns; (b) $t = 5$ ns; (c) $t = 7.5$ ns; (d) $t = 11.5$ ns.

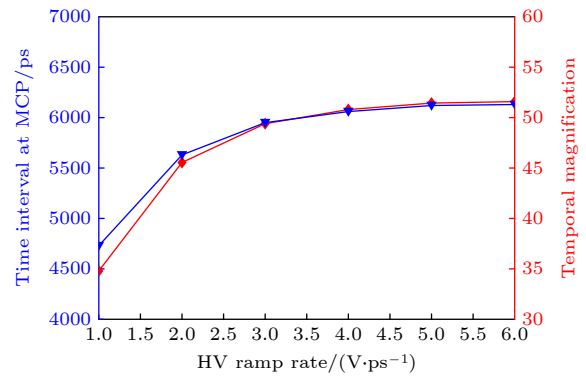


图 6 不同斜率调制信号下的电子脉冲展宽时间间隔及时间展宽因子
Fig. 6. Electronic pulse stretching time interval and time stretching factor under different slope modulation signals.

3.2 时间展宽因子补偿特性评估

X 射线成像器件的时间分辨率与时间展宽因子成反比.本节重点研究光电子在 $\pm 90^\circ$ 弯曲电子束聚焦及导引互补结构中的时间展宽因子.由于轴

向电磁场和光电子运行路径不同, 光电阴极面发射的光电子渡越时间约为几十纳秒. 标记电子束输入聚焦及导引结构中电子入射位置为 A , 电子束缓冲聚焦及导引结构沿电子运行方向 $1/2$ 处的位置为 B , 电子束输出聚焦及导引结构中电子束输出处的位置为 C . 图 7 显示了未施加调制信号条件下整个光电阴极面 $\Phi 16$ mm 范围内的光电子运行轨迹. 显然, $y = 8$ mm 处出射的光电子在 A - B 段的光程最大, 在 B - C 段的光程最小; $y = -8$ mm 处出射的光电子在 A - B 段的光程最小, 在 B - C 段的光程最大, 如此, 便可有效补偿 $1/4$ 弯曲结构引起的时间弥散, 整个阴极有效范围内光电子束的渡越时间为 32 ns. 为评估阴极不同位置处的时间展宽因子补偿情况, 仿真中在光电阴极 (-8 mm, 8 mm) 的范围内, 每间隔 2 mm 发射一个半径为 1 mm 的电子源, 电子源发射呈高斯形式分布, 半高全宽为 50 fs, 分别计算了光电阴极不同位置处光电子脉冲的时间展宽因子, 如图 8 所示. 仿真结果表明, 在 $+90^\circ$

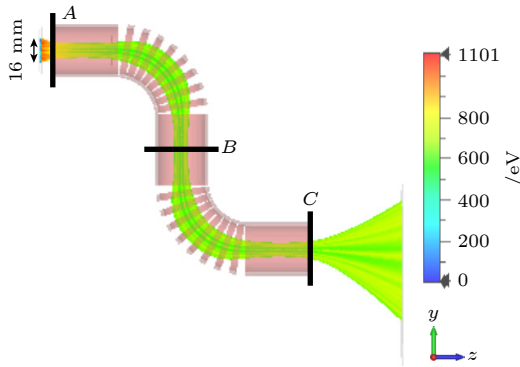


图 7 光电阴极 $\Phi 16$ mm 范围内电子运行轨迹

Fig. 7. Photoelectrons trajectory within $\Phi 16$ mm effective photocathode.

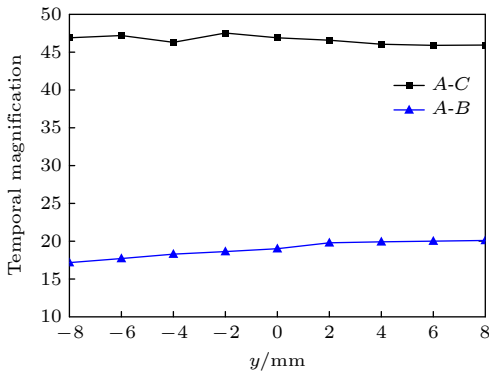


图 8 光电阴极不同离轴距离处光电子的时间展宽因子

Fig. 8. Temporal magnification at different distance to the axis of the cathode.

弯曲结构电子束导引管中 (A - B 段, 如蓝色曲线所示), 光电子脉冲的时间展宽因子均匀性 $D_1 = (20.1-17.17)/(17.17+20.1) = 7.86\%$; 引入 -90° 弯曲补偿电子束导引管结构之后, 光电子脉冲的时间展宽因子均匀性 $D_2 = (47.53-45.9)/(47.53+45.9) = 1.74\%$. 在整个阴极有效范围内, 有效实现了时间展宽因子的补偿.

3.3 空间放大倍率

电子束输出聚焦及导引结构对光电子有聚焦作用. 假设光电子进入电子束输出聚焦及导引结构时的初始速度为 $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$ (分量为 v_x, v_y, v_z), 电子束输出聚焦及导引结构的磁感应强度为 B , 电子的荷质比为 η , 由于磁场只改变光电子的运动方向而不改变其速率, 因此 v 为常数, 受洛伦兹力作用, 光电子以初始速度沿 X - Y 面做圆周运动, 运行半径 $R = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} / (\eta B)$. 光电子同时以恒定速率 v_z 沿磁场方向前进, 即整体运动过程中, 光电子以恒定速率做螺旋运动^[16]. 光电子出射聚焦及导引结构后, 仅受阳极加速电场作用运动至 MCP, 因此光电子的空间放大作用主要集中于电子束输出聚焦及导引结构至 MCP 区域. 文中研究了空间放大倍率随 MCP 与电子束输出聚焦及导引结构之间的距离 d 的变化关系, 如图 9 所示. 随着距离 d 的增大, X 射线成像器件空间放大倍率近乎线性增大. 如此, 该 X 射线成像器件可适配不同尺寸的 MCP 进行电子倍增. 当工作于强电磁辐射环境时, 可采用空间放大倍率较大的距离设置, 以避免 MCP 输出电流密度产生自饱和效应.

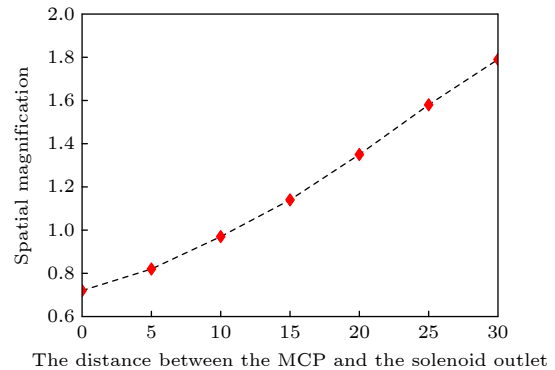


图 9 不同距离 d 对应的成像器件空间放大倍率

Fig. 9. Spatial magnification of the detector with different distance between solenoid outlet and input surface of the MCP.

3.4 X 射线成像器件增益及时间分辨特性研究

MCP 相关研究工作已经非常成熟^[17-19], 本节不再重点展开研究. 根据 3.3 节的讨论设置 MCP 与电子束输出聚焦及导引结构的距离为 10 mm, 在不同的工作电压下计算 X 射线成像器件的增益和时间分辨能力. 本节中, 选取厚度为 373.6 μm 的单层 MCP 结构, 微通道与端面之间具有 12° 斜角; 通道孔径为 10 μm , 工作电压为 750—1000 V, 输入电极和输出电极的浸入深度均为 5 μm ^[20]. 图 10 是在不同的 MCP 工作电压下利用二次电子倍增效应得到的电子增益. 显然, 随着电压的增大, 电子增益逐渐增大, 这与文献 [20] 变化趋势一致; 但增益较文献 [20] 小, 主要是因为受旋转电磁场分布的影响, 光电子进入 MCP 通道时, 初始入射角和 MCP 的加速电位存在一定夹角, 二次电子发射系数未达到最大值所致.

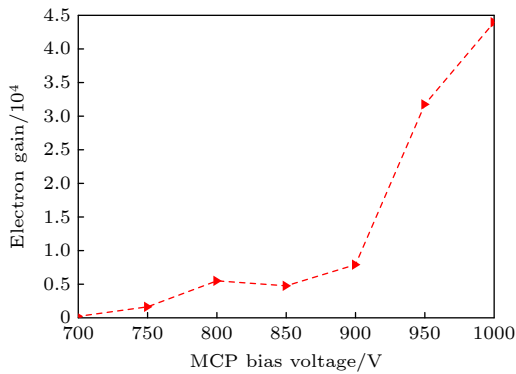


图 10 时间弥散补偿型低噪声 X 射线成像管增益与 MCP 工作电压的关系
Fig. 10. Electron gain versus MCP bias voltage of the low-noise X-ray imaging tube with time dispersion compensated.

时间分辨率指 X 射线成像器件所能分辨的最小时间间隔^[21]. 仿真过程中, 于 X 射线成像管的光电阴极中心处发射两个间隔 5 ps 的单光电子, 在脉冲调制信号作用下, 两个光电子在时间域展宽之后进入 MCP 倍增, 并经阳极输出. 图 11(a) 给出了 MCP 不同工作电压下阳极输出光电子脉冲的归一化分布曲线. MCP 工作电压越大, 光电子渡越时间越小, 输出脉冲的半高全宽越小. 图 11(b) 给出了当 MCP 工作电压为 800 V 时, 阳极输出电子脉冲的归一化分布曲线, 可见, 两个间隔 5 ps 的光电子经时间弥散补偿型低噪声 X 射线成像器件后完全可分辨, 经 MCP 倍增后输出两束电子脉冲

的半高全宽分别为 74 ps 和 76 ps.

为评估时间弥散补偿型低噪声高时间分辨 X 射线成像器件的极限时间分辨率, 在光电阴极中心位置处分别发射间隔为 $\delta\tau_1 = 1$ ps, $\delta\tau_2 = 2$ ps, $\delta\tau_3 = 3$ ps 及 $\delta\tau_4 = 4$ ps 的两个光电子, 图 12 给出了 4 种情况下光电子脉冲的归一化分布曲线. 从

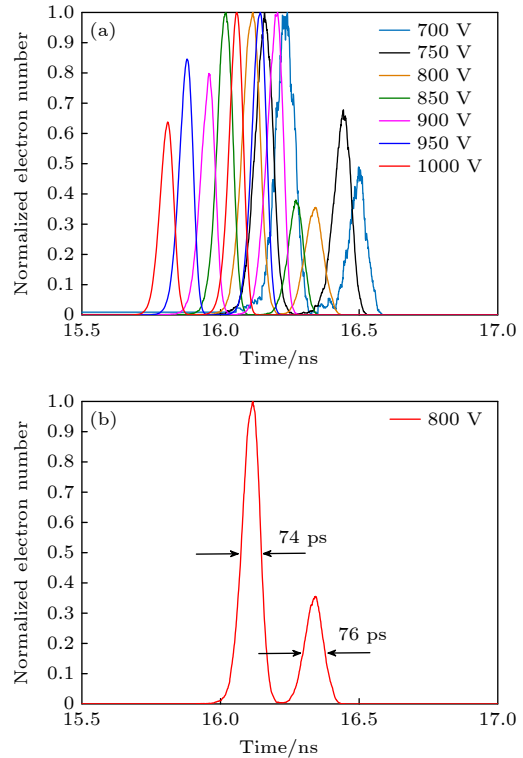


图 11 间隔 5 ps 的光电子时间分辨情况 (a) 不同电压下输出脉冲的归一化分布; (b) 800 V 电压下, 输出脉冲的归一化分布

Fig. 11. Photoelectron temporal resolution at 5 ps intervals: (a) Normalized intensity distribution of output pulses at different MCP bias voltage; (b) normalized intensity distribution of output pulses at 800 V MCP bias voltage.

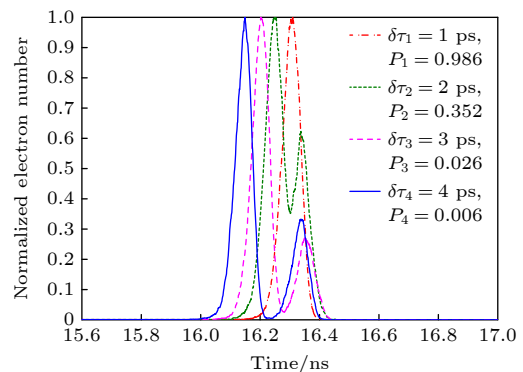


图 12 不同时间间隔的光电子在 MCP 出口处的时间分辨情况

Fig. 12. Time-resolved situation of photoelectrons at the MCP outlet at different time intervals.

图 12 可以看出, 4 种不同时间间隔的光电子在阳极的输出电子脉冲均有一定程度的交叠. 将电子概率分布曲线的谷底位置对应的分布概率记为 P_1 , P_2 , P_3 及 P_4 (对应阴极发射电子时间间隔为 $\delta\tau_1$, $\delta\tau_2$, $\delta\tau_3$ 及 $\delta\tau_4$), 根据仿真结果有: $P_1 = 0.986$, $P_2 = 0.352$, $P_3 = 0.026$, $P_4 = 0.006$. 根据瑞利判据所要求的 0.7 可知, 该成像器件的极限时间分辨率为 2 ps.

4 总 结

为了设计出适合在强辐射环境中应用的低噪声高时间分辨 X 射线成像器件, 本文提出了一种新型的时间弥散补偿型低噪声高时间分辨 X 射线成像器件, 主要由光电阴极、加速电极、“S”型时间弥散补偿结构及 MCP 电子倍增器件构成. 结合脉冲调制技术和“S”型时间弥散补偿结构, 既可降低时间弥散, 提高时间分辨率, 也可过滤高能伽马及中子噪声, 实现强辐射环境中信号的高信噪比探测. 数值计算了脉冲调制电压斜率对时间展宽因子的影响, 结果表明, 时间展宽因子随调制信号斜率 (1—6 V/ps) 的增大逐渐提升, 主要是因为当调制脉冲信号斜率增大时, 光电阴极和加速栅极之间电场的变化速率增大, 导致光电子脉冲从栅极出射的速度差增大, 经相同漂移距离后时间展宽效果越明显; 理论计算了未施加脉冲调制信号时, 光电子在“S”型时间弥散补偿结构两个部分 ($A-B$ 段和 $B-C$ 段) 的时间展宽情况. 结果表明, 在 $A-B$ 段, 随着 y 的增大, 时间展宽因子逐渐正向增大, 均匀度为 7.86%; 在 $B-C$ 段, 随着 y 的增大, 时间展宽因子变化很小, 均匀度为 1.75%, 实现了时间弥散补偿. 仿真了 MCP 电子倍增器与“S”型时间弥散补偿结构的距离 d 对空间放大倍率的影响. 结果表明, 空间放大倍率随 d 几乎呈线性增大, 可适配不同尺寸的 MCP. 理论模拟了 MCP 工作电压对 X 射线成像器件电子增益的影响. 结果显示, 随着 MCP 工作电压 (700—1000 V) 的升高, 成像器件的电子增益急剧增大, 可达 10^4 , 但比单 MCP 增益仿真结果 (10^5) 低一个数量级, 主要归因于“S”型时间弥散补偿结构的电磁场分布会使得光电子做螺旋运动, 光电子到达 MCP 输入端面时的速度与 MCP 输入端面并非垂直所致. 系统研究了该新型 X 射线成像器件在不同的 MCP 工作电压下, 均可对间隔 5 ps 的光电子完全分辨. 最后, 研究了 MCP 工

作电压为 800 V 时, 不同时间间隔的光电子在阳极处输出电子脉冲的时间分辨情况, 结果表明该 X 射线成像器件的极限时间分辨率为 2 ps. 本文所设计的低噪声高时间分辨 X 射线成像器件具有时间分辨率高、噪声低、信噪比高及动态范围大的优势, 有望应用于惯性约束核聚变等强辐射环境中实现对超快光脉冲的高质量诊断.

参考文献

- [1] Wang Q Q, Cao Z R, Chen T, Deng B, Deng K L, Tian J S 2021 *Rev. Sci. Instrum.* **92** 123305
- [2] Fu W Y, Huang J K, Wang D, Lei Y F, Wang Y, Deng P K, Long J H, Cai H Z, Lui J Y 2020 *IEEE Access* **8** 47533
- [3] Gales S G, Horsfield C J, Meadowcroft A L, Leatherland A E, Herrmann H W, Hares J D, Dymoke-Bradshaw A K L, Milnes J S, Kim Y H, Kleinrath H G, Meaney K, Zylstra A B, Parker S, Hussey D, Wilson L, James S F, Kilkenny J D, Hilsabeck T J 2018 *Rev. Sci. Instrum.* **89** 063506
- [4] Cai H Z, Luo Q Y, Lin K X, Deng X, Liu J K, Yang K Z, Wang D, Chen J J, Wang J H, Long J H, Niu L H, Lei Y F, Liu J Y 2024 *Nucl. Sci. Tech.* **35** 126
- [5] Dymoke-Bradshaw A K L, Hares J D, Milnes J, Herrmann H W, Horsfield C J, Gales S G, Leatherland A, Hilsabeck T, Kilkenny J D 2018 *Rev. Sci. Instrum.* **89** 101137
- [6] Herrmann H W, Kim Y H, Zylstra A B, Gepper-Kleinrath H, Meaney K D, Young C S, Lopez F E, Fatherley V E, Pederson B J, Oertel J A, Hernandez J E, Carrera J, Khater H, Rubery M S, Horsfield C J, Gales S, Leatherland A, Hilsabeck T, Kilkenny J D, Malone R M, Batha S H 2018 *Rev. Sci. Instrum.* **89** 101148
- [7] Cai H Z, Fu W Y, Wang D, Lei Y F, Gu L, Liu J Y 2019 *Optik* **185** 441
- [8] Hares J D, Dymoke-Bradshaw A K L, Hilsabeck T J, Kilkenny J D, Morris D, Horsfield C J, Gales S G, Milnes J, Herrmann H W, McFee C 2016 *J. Phys. Conf. Ser.* **717** 012093
- [9] Hilsabeck T J, Hares J D, Kilkenny J D, Bell P M, Dymoke-Bradshaw A K L, Koch J A, Celliers P M, Bradley D K, McCarville T, Pivovarov M, Soufli R, Bionta R 2010 *Rev. Sci. Instrum.* **81** 10E317
- [10] Trosseille C, Nagel S R, Hilsabeck T J 2023 *Rev. Sci. Instrum.* **94** 021102
- [11] Theobald W, Sorce C, Bedzyk M, Ivancic S T, Marshall F J, Stoeckl C, Shah R C, Lawrie M, Regan S P, Sangster T C, Campbell E M, Hilsabeck T J, Englehorn K, Kilkenny J D, Morris D, Chung T M, Hares J D, Dymoke-Bradshaw A K L, Bell P, Celeste J, Carpenter A C, Dayton M, Bradely D K, Jackson M C, Pickworth L, Nagel S R, Rochau G, Porter J, Sanchez M, Claus L, Robertson G, Looker Q 2018 *Rev. Sci. Instrum.* **89** 10G117
- [12] Nagel S R, Carpenter A C, Park J, Dayton M S, Bell P M, Bradley D K, Funsten B T, Hatch B W, Heery S, Hill J M, Holder J P, Hurd E R, Macaraeg C C, Patel P B, Petre R B, Piston K, Trosseille C A, Englehorn K, Hilsabeck T J, Chung T M, Dymoke-Bradshaw A K L, Hares J D, Claus L D, England T D, Mitchell B B, Porter J L, Robertson G, Sanchez M O 2018 *Rev. Sci. Instrum.* **89** 10G125
- [13] Gou Y S 2017 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xi'an Institute of

- Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Science) (in Chinese) [缙永胜 2017 博士学位论文 (西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所)]
- [14] Nagel S R, Hilsabeck T J, Bell P M, Bradley D K, Ayers M J, Barrios M A, Felker B, Smith R F, Collins G W, Jones O S, Kilkenny J D, Chung T, Piston K, Raman K S, Sammuli B, Hares J D, Dymoke-Bradshaw A L D 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 10E116
- [15] Mohamed Z L, Kim Y, Knauer J P, Rubery M S 2023 *Phy. Rev. C* **107** 014606
- [16] Cao F, Zhang L, He Y, Bai T 2025 *Photoelectric Imaging Technology and System* (2nd Ed.) (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p235 (in Chinese) [曹峰梅, 张丽君, 何玉青, 白廷柱 2025 (北京: 电子工业出版社) (第2版) 第235页]
- [17] Chen L, Wang X, Tian J, Liu C, Liu H, Chen P, Wei Y, Sai X, Sun J, Si S, Wang X, Lu L, Tian L, Hui D, Guo L 2016 *Nucl. Instrum. Meth. A* **840** 133
- [18] Li L L, Tian J S, Chen P, Guo L H, Wang X, Liu H L, Xue Y H, Xin L W, Gao G L, He K, Gou Y S, Zhang M R, Li S H, Sai X F, Liu B Y, Xu X Y, Qu Y S, Zhao W 2022 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **69** 850
- [19] Chen P, Tian J S, Qian S, Zhao T C, Liu H L, Wei Y L, Sai X F, He J P, Wang X, Lu Y, Chen L, Guo L H, Pei C Q, Hui D D 2017 *Nucl. Instrum. Meth. A* **848** 1
- [20] Chen L, Wang X C, Tian J S, Zhao T C, Liu C L, Liu H L, Wei Y L, Sai X F, Wang X, Sun J N, Si S G, Chen P, Tian L P, Hui D D, Guo L H 2017 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **64** 1080
- [21] Li H, Chen P, Tian J S, Xue Y H, Wang J F, Gou Y S, Zhang M R, He K, Xu X Y, Sai X F, Li Y H, Liu B Y, Wang X L, Xin L W, Gao G L, Wang T, Wang X, Zhao W 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 028501 (in Chinese) [李杭, 陈萍, 田进寿, 薛彦华, 王俊锋, 缙永胜, 张敏睿, 何凯, 徐向晏, 赛小锋, 李亚晖, 刘百玉, 王向林, 辛丽伟, 高贵龙, 汪韬, 王兴, 赵卫 2022 物理学报 **71** 028501]

Design of time dispersion compensated low-noise and high temporal resolution X-ray imaging tube*

TIAN Liping¹⁾ YANG Yang²⁾ FENG Penghui²⁾ CHEN Lin¹⁾
 XUE Yanhua²⁾ ZHANG Xiang¹⁾ SHEN Lingbin¹⁾
 TIAN Jinshou²⁾ GOU Yongsheng^{2)†}

1) (School of Network and Communication Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

2) (State Key Laboratory of Ultrafast Optical Science and Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Science, Xi'an 710119, China)

(Received 6 December 2025; revised manuscript received 12 January 2026)

Abstract

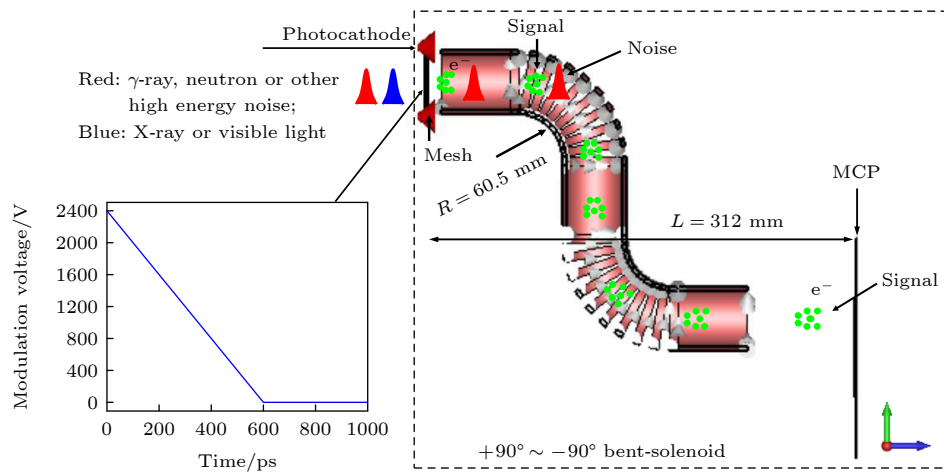
To design a low-noise high temporal resolution X-ray detector suitable for application in strong radiation environments, a new time dispersion compensation low-noise high-resolution X-ray imaging tube is proposed in this work. This tube is mainly composed of a photocathode, an acceleration electrode, an “S” type time dispersion compensation structure, and a microchannel plate (MCP) electron multiplier tube. By combining pulse modulation technology and an “S”-type time dispersion compensation structure, this tube can not only reduce time dispersion and improve temporal resolution, but also filter high-energy neutron noise, thereby achieving high signal-to-noise ratio detection of signals in strong radiation environments. The effect of pulse modulation voltage slope on time magnification is calculated, and the results show that the time amplification factor increases gradually with the increase of modulation signal slope (1–6 V/ps). This is mainly because when the slope of the modulated pulse signal increases, the rate of change in the electric field between the photocathode and the accelerating mesh increases, resulting in a difference in speed between the photoelectron pulses emitted from the mesh, and the time dispersion effect becomes more pronounced after the same drift length.

The theoretical results show that in the *A-B* section, with the increase of *y*, the temporal magnification

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Young Scientists Fund) (Grant No. 12405246) and the National Natural Science Foundation of China Major Scientific Research Instrument Program (Grant No. 12127810).

† Corresponding author. E-mail: yshgou@163.com

gradually increases positively, and the uniformity is 7.86%. In the *B-C* section, with the increase of *y*, the changes of temporal magnification are minimal, and the uniformity is 1.75%, which realizes temporal dispersion compensation. The effect of the distance *d* between the MCP electron multiplier and the “S” type time dispersion compensation structure on the spatial magnification is simulated, and the results show that the spatial magnification increases almost linearly with *d*, making it adaptable to different sizes of MCPs. The effect of MCP working voltage on the electronic gain of X-ray imaging tube is simulated, and the results show that with the increase of MCP working voltage (700–1000 V), the electronic gain of the imaging tube increases sharply, up to 10^4 , but it is an order of magnitude lower than the result of single MCP gain simulation (10^5), which is mainly attributed to the electromagnetic field distribution of the “S” type time dispersion compensation structure and can make the photoelectrons spiral, and the velocity of the photoelectrons when they reach the MCP input face is not perpendicular to the MCP input face. The new X-ray imaging tube can completely resolve photoelectrons at 5 ps intervals at different MCP operating voltages. Finally, the temporal resolution of photoelectron output pulses at the anode is investigated at an MCP operating voltage of 800 V. The results indicate that the ultimate temporal resolution of the X-ray imaging device is 2 ps. The low-noise and high temporal resolution X-ray imaging tube designed in this work has the following advantages: high temporal resolution, low noise, high signal-to-noise ratio, and large dynamic range, and is expected to be used in strong radiation environments such as inertial confinement nuclear fusion to achieve high-quality diagnosis of ultrafast light pulses.



Keywords: electron beam guiding tube with $\pm 90^\circ$ curved structure, high-energy gamma and neutron radiation noise, X-ray imaging tube

DOI: [10.7498/aps.75.20251680](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251680)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251680](https://cstr.org.cn/32037.14.aps.75.20251680)

时间弥散补偿型低噪声高时间分辨X射线成像器件设计

田丽萍 杨阳 冯鹏辉 陈琳 薛彦华 张翔 沈令斌 田进寿 缙永胜

Design of time dispersion compensated low-noise and high temporal resolution X-ray imaging tube

TIAN Liping YANG Yang FENG Penghui CHEN Lin XUE Yanhua ZHANG Xiang SHEN Lingbin
TIAN Jinshou GOU Yongsheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 030503 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251680

CSTR: 32037.14.aps.75.20251680

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251680>

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

大口径锥型玻璃管X射线透镜的设计与模拟

Design and simulation of X-ray lens with large diameter conical glass tube

物理学报. 2025, 74(14): 140702 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250369>

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>

上海软X射线自由电子激光单脉冲成像定时的设计与实现

Design and implementation of timing system for single-shot imaging at Shanghai soft X-ray free-electron laser

物理学报. 2024, 73(12): 120701 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240383>

X射线荧光CT成像中荧光产额、退激时间、散射、偏振等关键物理问题计算与分析

Calculation and analysis of key physical problems: Fluorescence yield, deexcitation time, scattering and polarization in X-ray fluorescence CT imaging

物理学报. 2021, 70(19): 195201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210765>

基于高次谐波X射线光源的三维纳米相干衍射成像技术

Three-dimensional nano-coherent diffraction imaging technology based on high order harmonic X-ray sources

物理学报. 2022, 71(16): 164205 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220976>

一种用于软X射线激光去相干的单玻璃管光学透镜设计

Design of a single glass tube optical lens for soft X-ray laser decoherence

物理学报. 2023, 72(3): 034203 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221917>