



·惯性约束聚变物理与技术·

高灵敏高稳定的碘化铯阴极密封式分幅变像管研制

杨 阳¹, 朱炳利¹, 缙永胜¹, 陈 震¹, 白晓红¹, 秦君军¹,
白永林¹, 刘百玉¹, 徐 鹏^{1,2}, 王 博¹, 曹伟伟¹

(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所 超快诊断技术重点实验室, 西安 710119; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为解决采用 Au 光电阴极、开放式结构的分幅变像管探测效率低、稳定性差的问题, 研制了一种采用 CsI 光电阴极的密封式分幅变像管。为了对比不同光电阴极对 X 射线的响应强度, 密封式分幅变像管制作有一条 Au 微带阴极和一条 CsI 微带阴极。完成了密封式分幅变像管的结构设计、工艺制作和实验测试。研究表明: 当加载半高宽度 200 ps、幅值 -2.7 kV 的选通脉冲时测得其时间分辨为 65 ps; 在非单色高能 X 射线源照射下, CsI 阴极的静态响应强度是 Au 阴极的 3.4 倍; 大气环境中存储 1000 h 后密封式分幅变像管的静态响应强度仅降低到完成制作时的 83%。上述结果表明采用 CsI 阴极的密封式分幅变像管具有更高的探测效率和稳定性, 可有效提升 X 射线分幅成像质量和可靠性。

关键词: 分幅相机; X 射线探测器; 超快诊断; 激光聚变诊断; CsI 光电阴极

中图分类号: TB872; TN143

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210192

Sealed X-ray framing tube with CsI photocathode to achieve high detection efficiency and stability

Yang Yang¹, Zhu Bingli¹, Gou Yongsheng¹, Chen Zhen¹, Bai Xiaohong¹, Qin Junjun¹,
Bai Yonglin¹, Liu Baiyu¹, Xu Peng^{1,2}, Wang Bo¹, Cao Weiwei¹

(1. State Key Laboratory of Ultrafast Diagnosis Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China;

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

Abstract: A hermetically sealed X-ray framing tube with CsI photocathode is proposed to solve the problems of poor stability and low detection quantum efficiency brought by the open structure framing tube with Au photocathodes. Two microstrip photocathodes of 100 nm Au and 100 nm CsI are fabricated to compare their sensitivities under the same environmental conditions. The structure and the fabrication process of the sealed framing tube are described in this paper. After fabrication, the sealed framing tube is tested to verify its performance. The measurement shows that exposure time of the proposed framing tube is 65 ps when gated by an ultrafast pulse with 200 ps width and -2.7 kV amplitude. At static mode, the image intensity of the CsI photocathode is 3.4 times that of the Au photocathode under the irradiation of non-monochromatic high energy X-ray source. Its static response intensity is reduced to 83% compared with the initial value after being stored in the laboratory air for 1000 h. These results indicate that the sealed framing tube with CsI photocathode can achieve higher detection efficiency and stability, and can effectively improve the quality and reliability of X-ray framing imaging.

Key words: framing camera; X-ray detector; ultra-fast diagnostics; fusion diagnosis; CsI photocathode

X 射线分幅相机作为可以实现二维成像, 且具有高时间分辨 (< 37 ps), 高空间分辨 (> 25 lp/mm) 的诊断设备^[1-3], 是靶丸内爆对称性、流体力学不稳定性 and 等离子体均匀性测量中所不可缺少的诊断设备, 在激光惯性约束核聚变和高能量密度物理研究中起到不可替代的作用^[4]。

随着数十年来 X 射线分幅成像技术的发展和研究的深入, 要求其实现高效率、高能谱、高可靠性的精密测量^[5-6]。现有 X 射线分幅相机使用的分幅变像管采用开放式结构, 只能使用 Au 等物理化学性质稳定的物质作为光电阴极

* 收稿日期: 2021-05-20; 修订日期: 2021-08-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(11803074); 中国科学院西部青年学者项目(XAB2016B25)

联系方式: 杨 阳, yangyang@opt.cn.

材料。但是,采用开放式结构和使用易放气的材料将导致微通道板(MCP)和 Au 阴极的污染,分幅变像管的增益还会随着存储时间的增长而衰减。为了保证测量的精密性需要在每次实验前进行标定。此外,每次使用相机的时候都需要重新建立真空工作环境,这在一定程度上也将影响相机工作的稳定性和测试结果的一致性。Au 对 X 射线的量子效率较低,研究发现这将导致相机探测效率减低,增大相机的图像噪声^[7]。使用高量子效率的碘化铯(CsI)作为光电阴极能够解决这一问题。无论在软 X 射线(< 10 keV)还是在高能 X 射线(10~100 keV)区域,CsI 光电阴极都具有较高的光电转换效率^[8-9]。然而 CsI 大气中极易潮解,导致其光电转化效率随暴露大气的时间增长而不断衰减^[10]。在惯性约束聚变(ICF)实验中,在数次打靶试验后需要对靶室放气进行换靶操作,诊断口也不时需要打开进行维护,这就不可避免的会把采用 CsI 阴极的诊断设备暴露于潮湿大气中。对于采用分立阴极的诊断设备如 X 射线条纹变像管,尚可以将潮解失效的 CsI 阴极进行替换以维持设备的有效工作^[11-12]。然而对 X 射线分幅变像管而言,由于阴极蒸镀在 MCP 输入面,更换 CsI 阴极需要将整个分幅变像管进行重新装配,过程复杂、成本高昂而无法实用。

针对采用 Au 阴极的开放式分幅变像管探测效率低、稳定性差的问题,本文研制了一种具有密封式结构、采用 CsI 阴极的密封式分幅变像管。完成了密封式分幅变像管的结构设计和工艺制作,并对密封式分幅变像管的时间分辨、静态响应、和静态响应强度随存储时间的变化关系进行了测试。研究表明基于 CsI 阴极的密封式分幅变像管具有更高的探测效率和稳定性,其使用可有效提高 X 射线分幅相机的成像质量和可靠性。

1 密封式分幅变像管关键参数分析和设计

密封式分幅变像管采用 CsI 作为光电阴极材料,由于 CsI 容易潮解,为保证其稳定性须将其封装在高真空环境中。因此在密封式分幅变像管的光敏面之前需要覆盖一层可透过 X 射线的窗口材料作为密封层。由于密封式分幅变像管在整管超高真空封装过程中还需进行烘烤排气工艺,因此密封层还需要满足耐压、耐高温、可与金属管壳进行密封焊接等要求。铍对于 X 射线吸收小,化学性质稳定易加工,耐高温烘烤,且能够以钎焊的方式与不锈钢和可伐合金进行真空密封焊接,因此选用铍作为密封式分幅变像管的 X 射线窗口材料。

X 射线窗口的作用相当于一个附加滤片,会对入射到密封式分幅变像管微带阴极光敏面的 X 射线光信号产生衰减。需要根据理论计算选择合适的铍窗厚度。实验研究表明在 0.1~10 keV 的软 X 射线波段,CsI 光电阴极的量子效率是 Au 光电阴极的 10~40 倍^[13]。因此,可以近似地认为当铍窗对 X 射线的透过率降低至 2.5%~10% 时,对同样强度的 X 射线光信号,经铍窗衰减后 CsI 阴极对其的光电响应与无铍窗的 Au 阴极相当。使用 XOP2.1 软件模拟了不同厚度铍窗对于 0.1~10 keV 能区内 X 射线的透过率,如图 1 所示。由图 1 可知,铍窗的厚度增加主要影响低能 X 射线的透过率,并会使透过率为 2.5%~10% 的 X 射线光子能量阈值向高能方向移动。为了提高对低能区 X 射线的透过率,铍窗的厚度应该尽量薄。然而,为了保证分幅成像的画幅数要求铍窗具有较大尺寸,同时铍窗还需具有一定厚度以保证其机械强度满足密封焊接和烘烤除气的工艺要求。最终权衡多种因素和实际的工艺条件,确定铍窗厚度为 100 μm 。

在分幅变像管中,光电阴极材料镀制在 MCP 输入面上,构成反射式光电阴极,并同时作为选通脉冲的加载电极。在密封式分幅变像管中,同样采用真空蒸镀法将 CsI 蒸镀在 MCP 输入面上。X 射线入射到 CsI 阴极材料上后将产生一次电子,一次电子在运动过程中将损失能量并激发产生多个二次电子,二次电子随后向发射表面运动并在此过程中可能会复合损失掉,那些到达表面的二次电子在克服表面势垒后发射到真空中。可见,CsI 光电阴极的厚度将影响其光电转化效率,需要模拟计算选择合适的阴极厚度。根据 Henke 提出的光电发射半经验公式,反射式 CsI 光电阴极的量子效率 Y 可表示为^[13]

$$Y = k\rho E\mu(E)\lambda_s \tanh\left(\frac{t}{2\lambda_s}\right) \quad (1)$$

其中: k 为玻耳兹曼常数, ρ 为质量密度, E 为 X 射线光子能量, $\mu(E)$ 为光离截面, λ_s 为吸收系数, t 为光电阴极厚度。为排除入射 X 射线光子能量对模拟的影响,将厚度无限大时的反射式 CsI 光电阴极的量子效率 $Y_{(t=\infty)}$ 作为归一化参数,绘出反射式 CsI 阴极归一化量子效率随阴极厚度的变化关系如图 2 所示。由图 2 可知当反射式 CsI 阴极的厚度大于 100 nm 时,其量子效率趋于理想状态。因此将反射式 CsI 光电阴极的厚度设计为 100 nm。另外,考虑到 CsI 的导电性能很差,为实现选通脉冲的高效传输,需在 CsI 和 MCP 之间蒸镀导电层。考虑到工艺的连贯性,将传统分幅变像管中 Au 微带阴极作为导电层,在完成 Au 微带制作之后直接在上面蒸镀反射式 CsI 阴极。

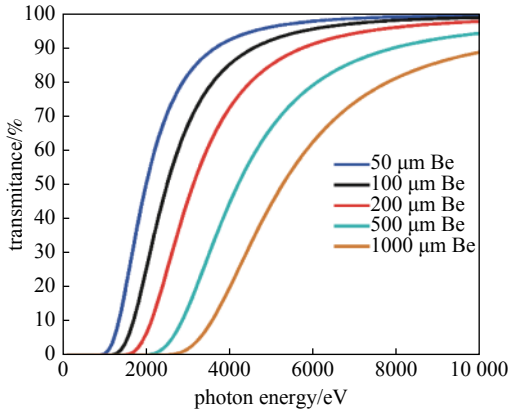


Fig. 1 Transmittance of Be window with different thickness as a function of X-ray photon energy

图1 不同厚度的铍窗对 X 射线透过率与 X 射线光子能量的关系曲线

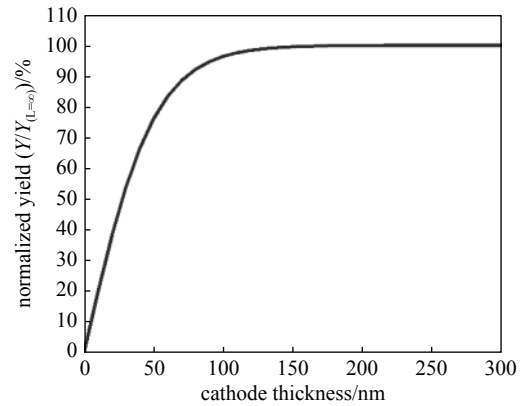


Fig. 2 Normalized yield of reflection mode CsI photocathode as a function of cathode thickness

图2 反射式 CsI 阴极归一化量子效率随阴极厚度的变化关系

2 密封式分幅变像管的结构设计

密封式分幅变像管结构如图 3 所示, 其由铍窗组件、镀有微带阴极的 MCP 和荧光屏组件构成, 上述组件被密封式的管壳封装在高真空环境中。

密封管壳由 304 不锈钢整体加工制成, 其前端设计有与靶室安装配合的法兰结构, 其四周和上下分别设计有与选通脉冲馈通、高压接头、铍窗组件和荧光屏组件进行焊接的配接结构。上述焊接配接结构都考虑到了对于焊接和烘烤排气时应力的释放。管壳一侧钎焊了无氧铜管, 用于与超高真空烘烤排气制作系统相连以使密封式分幅变像管达到 $<10^{-6}$ Pa 的超高真空状态。铍窗组件由厚度 100 μm 、尺寸 50 mm \times 50 mm 的铍膜以钎焊的方式焊接在不锈钢支撑架上, 再以激光焊接的方式与密封外壳焊接。

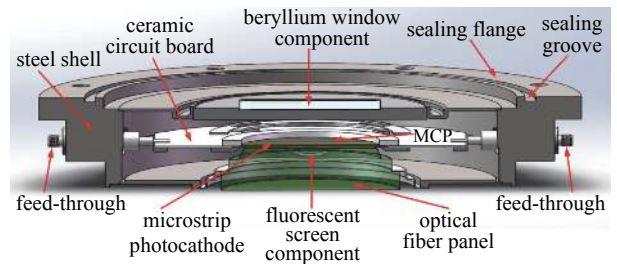


Fig. 3 Schematic structure of the sealed X-ray framing tube

图3 密封式分幅变像管结构示意图

密封式分幅变像管采用厚度 0.5 mm、直径 56 mm 的 MCP, 其通道直径 12 μm 、斜切角为 8 $^\circ$ 。在 MCP 输入面上蒸镀了两条宽 6 mm 的微带阴极。为了在同样的封装环境下对比 Au 阴极和 CsI 阴极对于 X 射线的响应, 首先蒸镀了 500 nm 的 Cu 和 100 nm 的 Au, 之后用掩膜板遮盖住其中一条微带, 在另一条微带上蒸镀了 100 nm 的 CsI。MCP 输出面整面蒸镀 Cu 作为接地。

MCP 微带的特征阻抗约为 6 Ω , 而传输选通脉冲的接插件的特征阻抗为 50 Ω 。为了降低选通脉冲的传输损耗, 采用了陶瓷基板制作了渐变微带, 其一端与 MCP 微带采用弹性机构进行压接, 另一端与接插件进行焊接。荧光屏制作在光纤面板基底上, 与 MCP 输出面近贴距离 0.8 mm 以保证足够的空间分辨。荧光屏与可伐合金采用玻璃钎焊的方式进行密封焊接, 之后与密封管壳采用激光焊接的方式进行密封。

3 密封式分幅变像管的工艺制作

密封式分幅变像管的制作工艺流程图如图 4 所示。在完成了各部分组件的清洗之后, 先采用激光焊接的方式将选通脉冲馈通、高压接头与管壳焊接起来; 将完成 CsI 和 Au 阴极蒸镀的 MCP 以及陶瓷电路板装配到位并完成电连接; 之后装配荧光屏组件、完成其与高压接头的电连接, 并完成其与密封管壳的激光密封焊接。完成上述工作后, 将未安装铍窗组件的密封式分幅变像管的对接法兰与一个具有紫外光窗口的真空腔室对接, 采用分子泵和机械泵组获得高真空后, 采用皮秒紫外脉冲激光对密封式分幅变像管进行时间分辨测试, 用以验证其性能。

将铍窗组件装配到管壳的指定位置并采用激光焊接的方式进行密封焊接。之后采用氦质谱仪完成整体装配的密封式分幅变像管进行检漏, 使整管的漏率 $<10^{-13}$ Pa \cdot m 3 /s。将密封式分幅变像管上的无氧铜管与高真空烘烤排气制作系统进行对接, 开启真空泵组进行真空排气, 并在 300 $^\circ\text{C}$ 下烘烤排气 48 h, 使密封式分幅变像管内的真空度 $<10^{-6}$ Pa。之后将密封式分幅变像管降至室温后, 对 MCP 进行静态加电, 采用便携式 X 射线管作为光源照射 MCP

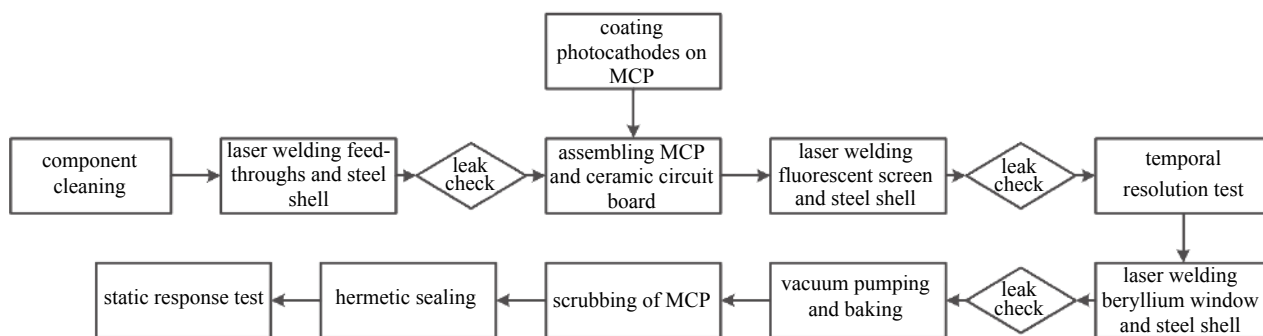


Fig. 4 Flow chart of sealed X-ray framing tube fabrication

图4 密封式分幅变像管工艺制作流程图

产生电子冲刷 MCP 微通道以实现进一步的清洁。最后采用捏封的方式完成密封式分幅变像管的真空封装。

为了保护密封式分幅变像管的激光焊接焊缝和捏封口,设计加工了聚四氟乙烯材质的变像管保护套,安装在密封式分幅变像管外围并对其进行灌封保护。项目组还配套研制了皮秒分幅相机电控系统用于驱动密封式分幅变像管,为其提供 MCP 偏置电压、荧光屏偏置电压、MCP 选通脉冲、脉冲屏压和调整脉冲延迟时间。完成研制的密封式分幅变像管和与之匹配的皮秒分幅相机电控系统如图 5 所示。

4 实验测试

4.1 时间分辨测试

密封式分幅变像管的时间分辨测试是在焊接铍窗组件之前进行的,其测试装置示意图如图 6 所示。将装配好的密封式分幅变像管通过管壳前部的对接法兰与一个具有紫外光窗口的真空腔室对接,采用分子泵和机械泵组抽气至低于 10^{-4} Pa 的工作真空。密封式分幅变像管的荧光屏输出面采用机械结构与 CCD 耦合采集图像。采用自研的皮秒分幅相机电控系统驱动密封式分幅变像管,为其提供 MCP 偏置电压、荧光屏偏置电压、MCP 选通脉冲、脉冲屏压和调整脉冲延迟。采用 EKSPILA PL3143 皮秒锁模 Nd: YLF 激光器,利用其脉宽 8 ps 的四倍频 263 nm 的紫外激光作为照明光源,经过扩束后将紫外激光均匀的照明微带阴极。

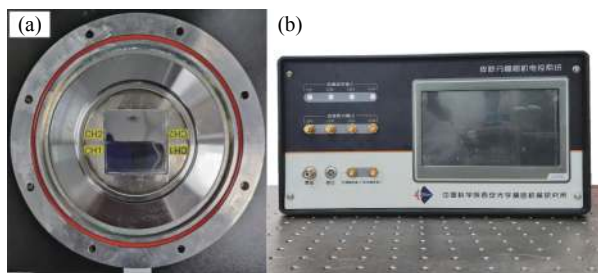


Fig. 5 Sealed X-ray framing tube (a) and electric control system (b)

图5 完成研制的密封式分幅变像管(a)和皮秒分幅相机电控系统(b)

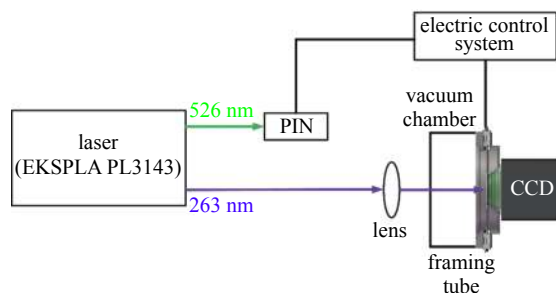


Fig. 6 Temporal resolution measurement setup

图6 时间分辨测试装置示意图

首先给密封式分幅变像管加载静态 MCP 偏置电压和荧光屏偏置电压,用 CCD 记录此时的静态图像。将脉冲激光器二倍频的 526.5 nm 激光用于照射 PIN 探测器用于产生触发信号,触发皮秒分幅相机电控系统产生选通脉冲。选通脉冲的半高宽为 200 ps,幅值为 -2.7 kV。调节选通脉冲延迟,使选通脉冲在 MCP 微带阴极传播时刻与皮秒紫外激光脉冲到达 MCP 微带阴极的时刻精确同步。此时选通脉冲存在的微带区域 MCP 具有足够的增益产生图像,采用 CCD 记录此时的动态图像。由时域反射法测定选通脉冲在此微带阴极上的传播速度为 0.18 mm/ps^[2],把沿选通脉冲传播方向记录的光强空间分布换算成光增益随时间的变化,可得曝光时间如图 7 所示。在计算中,静态图像中光强的空间分布用于对动态图像进行归一化以消除脉冲激光光源空间分布不均造成的影响。由图 7 可知,密封式分幅变像管在选通脉冲的驱动下,其曝光时间为 65 ps。

4.2 静态响应测试

密封式分幅变像管的静态响应测试是在其完成超高真空封装之后进行的,其实验装置实物图如图 8 所示。采用皮秒分幅相机电控系统给密封式分幅变像管加载静态偏压,采用便携式 X 射线管作为 X 射线源照射密封式分

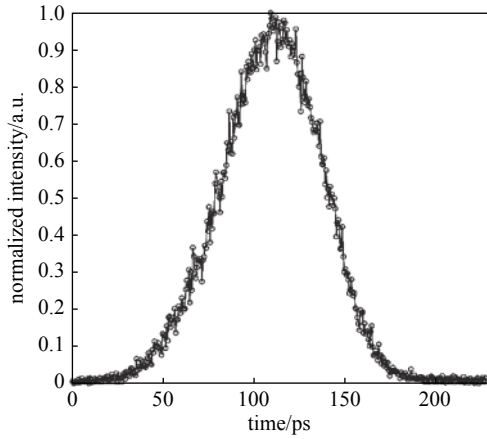


Fig. 7 Measured temporal resolution of X-ray framing tube, the measured exposure time is 65 ps

图 7 分幅变像管时间分辨测试结果,其曝光时间为 65 ps

幅变像管的光敏面,利用 CCD 记录荧光屏的输出图像。X 射线光管采用 Wu 靶,其内置电源可产生一个 70 kV 的偏置高压加速热电子轰击 Wu 靶产生 X 射线。

CCD 记录的密封式分幅变像管静态图像如图 9 所示。静态图像中图像亮度的空间非均匀主要是由于该实验中使用的 X 射线管产生的 X 射线强度空间分布不均所导致的。通过分析图像计数可知,CsI 阴极微带的响应强度为 Au 阴极微带响应强度的 3.4 倍。CsI 和 Au 微带阴极图像计数的差距小于 CsI 和 Au 阴极量子效率的差距^[9]。这主要是因为实验中采用的 X 射线源不是单色光源,且其产生的韧致辐射能量较高达 70 keV^[14]。对于这样的高能 X 射线,很多 X 射线光子是在 MCP 体内吸收产生二次电子。此时 MCP 相当于一个具有一定厚度的体阴极,其对于 X 射线的光电响应作为一个本底,使两条微带阴极上由于 CsI 和 Au 量子效率不同产生的探测灵敏度差异表现得不是很显著。

4.3 静态响应稳定性测试

CsI 具有更高的量子效率,有利于提高分幅成像的探测效率降低图像噪声,使其能够获得更精细的靶丸内爆图像。同时 CsI 能够响应能量更大的 X 射线,更加适用于康普顿散射照相等需要高能 X 射线成像的应用场景^[15-16]。然而 CsI 会在潮湿大气中潮解,导致其量子效率随着在空气中暴露的时间增长而迅速下降,这严重限制了其应用。密封式分幅变像管能够为内部的光电阴极、MCP 和荧光屏等对环境因素敏感的元件提供稳定的超高真空工作环境,显著提高了设备性能的稳定性。

为了测试采用 CsI 阴极的密封式分幅变像管的工作稳定性,对其静态响应强度随存储时间的变化关系进行了测试。其实验装置与静态响应测试类似,在测试过程中,便携式 X 射线源与变像管的位置固定不变。密封式分幅变像管工作在直流模式下,MCP 电压设置为 -700 V、屏压设置为 2500 V 固定不变。在整个测试过程中,固定 X 射线源的加电条件、加电时间和 CCD 的曝光时间。采用 CCD 记录图像并选定固定区域的平均计数作为静态响应强度。密封式分幅变像管的整个测试过程一直在实验室大气环境下进行,实验室的湿度在 55%~78% 的范围内变化,温度在 25 ℃ 附近波动。为了对分幅变像管的工作稳定性进行对比,对采用金阴极的开放式分幅变像管静态响应强度随暴露大气时间的衰减情况进行了实验测试。为了模拟分幅变像管在靶场的实际工作状态,将分幅变像管对接在真空腔室上,采用真空泵组将腔室抽至 $<5 \times 10^{-4}$ Pa 的工作真空,进行静态响应测试之后,将腔室在实验室大气环境下放气保持一段时间,再将腔室抽气并在低真空状态下进行保存。金阴极开放式分幅变像管的静态响应测试条件和实验环境与密封式分幅变像管相同。图 10(a) 绘出了密封式分幅变像管静态响应强度随时间的变化曲线。经过 1000 h 的存储后,密封式分幅变像管静态响应强度缓慢降低至最初完成制作时的 83%。对比现有采用开

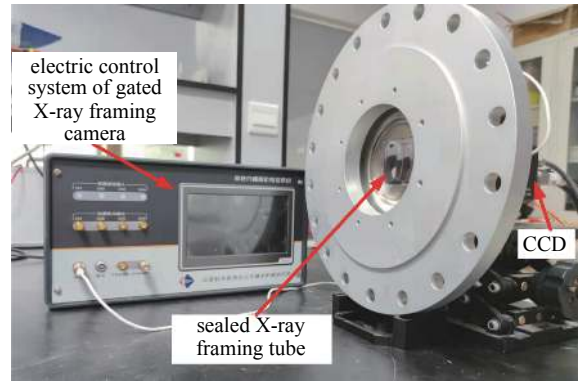


Fig. 8 Experimental setup of static response test

图 8 密封式分幅变像管静态响应测试装置图

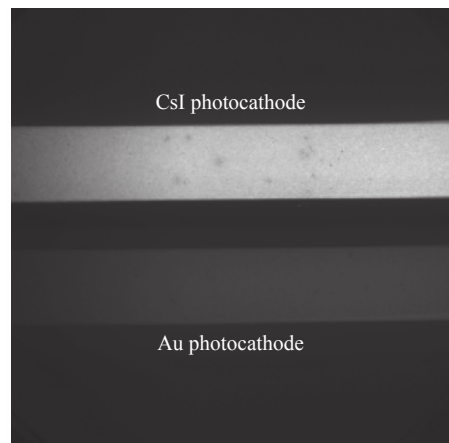


Fig. 9 Static response image of sealed X-ray framing tube

图 9 密封式分幅变像管静态响应测试结果

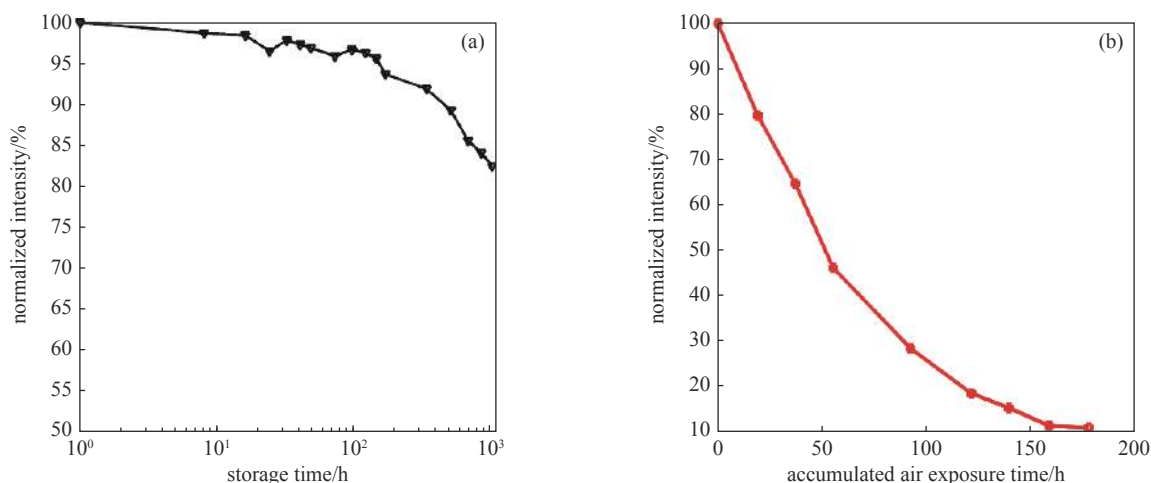


Fig. 10 (a) Normalized intensity of sealed X-ray framing tube with CsI photocathode as a function of storage time and (b) normalized intensity of open-structured X-ray framing tube with Au photocathode as a function of accumulated air exposure time

图 10 (a) CsI 阴极密封式分幅变像管静态响应强度随存储时间的变化关系和 (b) Au 阴极开放式分幅变像管静态响应强度随累计大气暴露时间的变化关系

放式结构的诊断设备,如采用 100 nm 厚的 CsI 阴极的 X 射线条纹相机,当累计暴露在大气中的时间超过 11 h 之后,其响应强度已下降至原有的 48%^[12]。而对于金阴极开放式分幅变像管,当其累计在大气中的暴露时间达到 177 h 后,其静态响应强度仅为原有的 11%,如图 10(b) 所示。虽然金阴极开放式分幅变像管静态响应强度随大气暴露时间的衰减情况可能会随分幅变像管的结构、所使用的材料、以及存储条件和环境的不同而变化,但上述实验结果仍能够说明密封式分幅变像管可有效提高相机的工作稳定性。

5 结论

研制了一种采用 CsI 光电阴极的密封式分幅变像管,详细介绍了密封式分幅变像管的结构组成和制作工艺。当在微带上加载半高宽为 200 ps,幅度为 -2.7 kV 选通脉冲时,采用皮秒紫外激光测得密封式分幅变像管的时间分辨为 65 ps。对完成真空封装的密封式分幅变像管进行静态响应测试表明,CsI 阴极的响应强度是 Au 微带的 3.4 倍。将密封式分幅变像管在实验室大气环境中存储 1000 h 后测试得到其静态响应强度仅降低到完成制作时的 83%。上述实验测试结果说明,具有 CsI 光电阴极的密封式分幅变像管具有更高的探测效率和更强的稳定性。对于传统开放式结构的分幅变像管,其校准和测试可以使用紫外脉冲激光器和高强度的脉冲 X 射线源,但是对于密封式分幅变像管,由于铍窗会阻挡紫外光,在完成真空密封后仅能使用 X 射线作为光源进行测试。传统高强度脉冲 X 射线是采用高能脉冲激光打靶产生等离子体辐射 X 射线的方式获得的,其系统复杂价格昂贵。现有的实验室 X 射线源由于其强度低,只能进行静态测试,在动态模式下无法获得有效信号。因此,研制高强度的脉冲 X 射线源、发展新的测试方法和技术,在实验室环境下完成密封式分幅变像管的测试和标定是下一步研究工作的重点任务。采用 CsI 阴极使密封式分幅变像管具有更高的探测效率,然而其厚达 100 μm 的铍窗对软 X 射线的吸收阻挡作用较强,这使得密封式分幅变像管更加适用于需对高能 X 射线进行成像诊断的场景(如 X 射线背光照相)^[15],以及需对经过 X 射线光学元件选能和衰减的高能 X 射线进行成像诊断的实验场景(如配合 Kirkpatrick-Baez 显微镜进行时间分辨二维成像)^[17]。如需对间接驱动 ICF 中黑腔能量学相关物理量的进行测量时,由于待测 X 射线绝大部分为 1.8 keV 以下,100 μm 的铍窗显然过厚。在现有工艺条件下,采用更薄的铍窗会使漏率升高且耐压性差,难以保证长久可靠的真空密封。针对上述需对软 X 射线进行探测的应用场景,可以基于现有密封式分幅变像管的所采用的低放气材料和器件构型,研制可以充入/抽出干燥氮气的 CsI 阴极分幅变像管。由于其无需进行高真空烘烤排气工艺处理,且保存时能够充入氮气平衡大气压力的影响,因此可以采用更薄的铍窗材料或者聚合物薄膜作为 X 射线窗口,提高对软 X 射线的探测能力。研制上述 CsI 阴极分幅变像管也是下一步的重点研究工作。

参考文献:

- [1] Bradley D K, Bell P M, Kilkenny J D, et al. High-speed gated X-ray imaging for ICF target experiments[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1992, 63(10): 4813-4817.
- [2] Chang Zenghu, Shan Bing, Liu Xiuqin, et al. Gated MCP framing camera with 60-ps exposure time[C]//Proceedings of SPIE 2549, Ultrahigh-and High-Speed

- Photography, Videography, and Photonics'95. 1995: 53-59.
- [3] Yang Wenzheng, Bai Yonglin, Liu Baiyu, et al. Temporal resolution technology of a soft X-ray picosecond framing camera based on Chevron micro-channel plates gated in cascade[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2009, 608(2): 291-296.
- [4] Oertel J A, Aragonz R, Archuleta T, et al. Gated X-ray detector for the National Ignition Facility[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77: 10E308.
- [5] 曹柱荣, 王强强, 邓博, 等. 激光聚变极端环境下X光高速摄影技术研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32(11): 112004. (Cao Zhurong, Wang Qiangqiang, Deng Bo, et al. Progress of X-ray high-speed photography technology used in laser driven inertial confinement fusion[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32(11): 112004)
- [6] 王峰, 张兴, 理玉龙, 等. 激光惯性约束聚变研究中高时空诊断技术研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32(11): 112002. (Wang Feng, Zhang Xing, Li Yulong, et al. Progress in high time- and space-resolving diagnostic technique for laser-driven inertial confinement fusion[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32(11): 112002)
- [7] Pawley C J, Deniz A V. Improved measurements of noise and resolution of X-ray framing cameras at 1–2 keV[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(3): 1286-1295.
- [8] Henke B L, Liesegang J, Smith S D. Soft-X-ray-induced secondary-electron emission from semiconductors and insulators: Models and measurements[J]. *Physical Review B*, 1979, 19(6): 3004-3021.
- [9] 黎宇坤, 陈韬, 李晋, 等. CsI光阴极在10—100 keV X射线能区的响应灵敏度计算[J]. *物理学报*, 2018, 67: 085203. (Li Yukun, Chen Tao, Li Jin, et al. Calculation of CsI photocathode spectral response in 10-100 keV X-ray energy region[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67: 085203)
- [10] Xie Yuguang, Zhang Aiwu, Liu Yingbiao, et al. Influence of air exposure on CsI photocathodes[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2012, 689: 79-86.
- [11] Chollet M, Ahr B, Walko D A, et al. Hard X-ray streak camera at the advanced photon source[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2011, 649(1): 70-72.
- [12] Opachich Y P, Kalantar D H, MacPhee A G, et al. High performance imaging streak camera for the National Ignition Facility[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83: 125105.
- [13] Henke B L, Knauer J P, Premaratne K. The characterization of X-ray photocathodes in the 0.1–10-keV photon energy region[J]. *Journal of Applied Physics*, 1981, 52(3): 1509-1520.
- [14] Boone J M, Seibert J A. An accurate method for computer-generating tungsten anode X-ray spectra from 30 to 140 kV[J]. *Medical Physics*, 1997, 24(11): 1661-1670.
- [15] Tommasini R, Hatchett S P, Hey D S, et al. Development of Compton radiography of inertial confinement fusion implosions[J]. *Physics of Plasmas*, 2011, 18: 056309.
- [16] Nagel S R, Trosseille C A, MacPhee A, et al. Evaluation of X-ray transmission photocathode detection issues in the energy range of 8-30 keV[C]//Proceedings of SPIE 11114, Hard X-Ray, Gamma-Ray, and Neutron Detector Physics XXI. 2019: 1111416.
- [17] Li Yaran, Mu Baozhong, Xie Qing, et al. Development of an X-ray eight-image Kirkpatrick–Baez diagnostic system for China's laser fusion facility[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(12): 3311-3318.