

基于各向异性及后加速技术的百飞秒 时间分辨条纹管设计*

田丽萍¹⁾³⁾ 沈令斌¹⁾³⁾ 陈萍²⁾ 刘玉柱³⁾ 陈琳¹⁾ 惠丹丹²⁾
陈希儒²⁾ 赵卫²⁾ 薛彦华^{2)†} 田进寿^{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, 中科院超快诊断技术重点实验室, 西安 710119)

3) (南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044)

(2023年8月24日收到; 2023年9月20日收到修改稿)

减小空间电荷效应及扫描偏转系统边缘场效应引起的时间弥散是实现百飞秒级时间分辨条纹管的关键. 本文提出并设计了一种新型飞秒条纹管, 结合超高加速电场、高扫描速度和后加速电场的设计, 可在光电阴极 $4\text{ mm}\times 10\text{ }\mu\text{m}$ 的范围内实现 100 fs 量级的时间分辨率. 通过优化设计加速电极结构, 使光电阴极有效探测范围内的电子均可在 15 kV/mm 量级的强电场中加速运行, 有效地抑制了电子脉冲的物理时间弥散; 在阳极入口处放置窄狭缝以减小大角度光电子引起的时空弥散对性能的影响; 最后在荧光屏处设置 +5000 V 的高电位, 以缩短光电子在等位区的渡越时间, 进一步减小空间电荷效应引起的时间弥散. 最终, 此设计方法能够将条纹管的时间分辨率提高至百飞秒量级.

关键词: 各向异性聚焦技术, 后加速技术, 时间分辨率, 飞秒条纹管

PACS: 85.60.Ha, 85.60.Bt, 42.79.ls, 87.64.ks

DOI: 10.7498/aps.72.20231382

1 引言

观察超快电子衍射、X 射线自由电子激光器等实验中的超快光学现象, 需要发展具备百飞秒级时间分辨和微米级空间分辨能力的超快诊断技术. 超快条纹相机是实现该目标的唯一高端科学测量与诊断仪器^[1-3]. 自 1949 年世界上首台条纹相机问世以来^[4], 各国科学家相继在提升条纹相机时间分辨率方面开展了许多研究工作. 目前, 最小化光电子渡越时间弥散 (降低物理时间弥散) 及最大化扫描

速度 (降低技术时间弥散) 是提升条纹管时间分辨率的主要途径, 主要取决于阴极附近的加速电场及扫描偏转灵敏度^[5,6]. 为了增强加速电场, Gallant 等^[7] 在单发模式下采用 25 kV/mm 的牵引场和 $0.56c$ (c 为光速) 的扫描偏转场实现了 350 fs 的时间分辨率, 且在狭缝方向实现了 $40\text{ }\mu\text{m}$ 的空间分辨率. Feng 等^[8] 利用栅网型阳极结构和光阴极之间形成 $\sim 10\text{ kV/mm}$ 的高梯度加速场, 实现了 233 fs 的时间分辨率, 且在积分模式下实现了 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的静态空间分辨率. Shakya 和 Chang^[9] 在阳极和电四极透镜间放置了一个窄狭缝, 提高了电子的准

* 2022 年度江苏省高等学校基础科学 (自然科学) 研究面上项目 (批准号: 22KJD140003)、中国科学院科研仪器设备研制项目 (批准号: GJJSTD20220006)、中国科学院战略性先导科技专项 A 类 (批准号: XDA25030900) 和中国科学院青年创新促进会 (批准号: 2021402) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xueyanhua@opt.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: tianjs@opt.ac.cn

直性, 实验获得了 280 fs 的时间分辨率. Kinoshita 等^[10]设计了一种新型的条纹管, 在 15 kV/mm 高电场强度加速及 3.67c 的高扫描速度下, 获得了半峰全宽 (full width at half maximum, FWHM) 为 101 fs 的超高时间分辨率. 目前, 采用静电聚焦或短磁聚焦的方法还未实现优于 100 fs 的时间分辨率.

本文针对目前飞秒条纹管存在时间分辨率低、空间分辨率低等不足, 设计了一款静电聚焦的百飞秒级时间分辨条纹管. 为了提高条纹管的时间分辨率, 采用平面阴极-狭缝型加速栅极结构提供高加速场强来降低物理时间弥散, 提高物理时间分辨率; 同时, 采用两组相互垂直且前后放置的板状聚焦电极, 形成各向异性聚焦电场, 如此设置可减小扫描方向和狭缝方向电子束腰处的电子流密度, 进而减小空间电荷效应引起的时间弥散; 此外, 后置空间聚焦电极组, 结合设置后加速电场 (荧光屏施加 +5000 V 高压) 的方法, 可使得电子束沿扫描方向的交叉点后移至荧光屏之前, 减小光电子束的渡越时间并降低渡越时间弥散, 以提高时间分辨率; 此外, 采用平行偏转板实现了 62 mm/kV 的偏转灵敏度, 能够提供 2c 的高扫描速度, 将条纹管技术时间弥散降低到 50 fs 以下. 本文主要根据时间分辨率的影响因素, 合理设计一种百飞秒级条纹变像管, 并对该飞秒条纹变像管的静态及动态特性进行分析.

2 飞秒条纹管的结构设计

2.1 时间分辨影响因素分析

条纹管时间分辨率可由 (1) 式给出^[9]:

$$\tau = \sqrt{\Delta t_j^2 + \Delta t_{\text{tech}}^2 + \Delta t_{\text{tts}}^2 + \Delta t_{\text{dd}}^2}, \quad (1)$$

其中, Δt_j 为时间抖动引起的时间弥散, Δt_{tech} 为技术时间弥散, Δt_{tts} 为渡越时间弥散, Δt_{dd} 为扫描偏转时间弥散. 目前对于单发工作模式的条纹管来说, Δt_j 几乎为零, 可忽略不计. 技术时间弥散 $\Delta t_{\text{tech}} = I_b/v_s$, 其中 I_b 为非扫描条件下荧光屏上输出图像沿扫描方向的宽度, v_s 为扫描速度. 物理时间弥散 $\Delta t_{\text{tts}} = 2.63\sqrt{\Delta\varepsilon}/E$ (ps), 其中 $\Delta\varepsilon$ 为阴极发射光电子能量分布的半高全宽, 单位为 eV; E 为光电阴极附近的加速场强, 单位为 kV/mm. 扫描偏转引起的时间弥散 $\Delta t_{\text{dd}} = d\alpha/v_a$, 其中 d 为动态

扫描模式下光电子束斑沿扫描方向的宽度, α 为最大偏转角度, v_a 为光电子束的平均轴向速度.

2.2 设计思路

由以上分析可知, 条纹管要实现百飞秒量级时间分辨率, 上述影响时间分辨率的每个因素均需小于 50 fs. 当采用 800 nm 的光辐照光电阴极, 产生光电子的能量分布半高全宽 $\Delta\varepsilon \approx 0.1$ eV, 则要求 $E \geq 14$ kV/mm; 静态工作条件下荧光屏输出图像尺寸越小, 扫描速度越大, 技术时间弥散越小; 但高扫描速度与动态扫描模式下光电子束斑沿扫描方向的宽度是一对矛盾因素. 因此, 需全面研究各个指标对时间分辨的影响因子, 权衡其对时间分辨率的影响.

传统飞秒条纹管采用高精度栅网加速结构提供高加速场强及电子运行速度, 此方法可减小空间电荷效应及电子初始状态引起的时间弥散, 提高时间分辨率. 但栅网加速结构会截获部分电子, 降低条纹管光子效率. 本文采用狭缝型加速结构代替栅网结构. 在阴极有效探测范围内, 狭缝型加速电极虽然具有高达 100% 的电子透过率, 但狭缝电场会引起电子束斑沿扫描方向展宽. 采用狭缝型阳极结构, 可去除沿扫描方向的大角度电子, 弥补狭缝加速电极引起的电子束斑空间展宽, 以提高时空分辨率. 鉴于光电阴极出射电子角度的随机性, 需合理设计聚焦电极的结构. 传统轴对称结构会引起电子束腰处具有较大的空间电荷排斥力, 因此, 可采用各向异性板状聚焦电极组, 对电子脉冲在扫描和狭缝方向分别聚焦以减小横向空间弥散及纵向时间弥散.

2.3 阴极及加速电极的设计

在飞秒条纹管的设计中, 阴极及加速电极间的高强度电场对缩短光电子渡越时间及减小物理时间弥散至关重要. 对电子脉冲起主要作用的是沿光轴 (z 方向) 电场, 因此电极设计的重点是既能获得高强度的电场, 又能使光电管获得较大的光子效率^[5]. 飞秒条纹管对光阴极附近电场的要求为 $E \geq 14$ kV/mm, 即需要在最小的加速电极间距内产生尽可能高的均匀电场. 本文基于三维电磁仿真软件 (computer simulation technology, CST), 理论分析两种常见的加速结构, 模型中设置阴极与加速

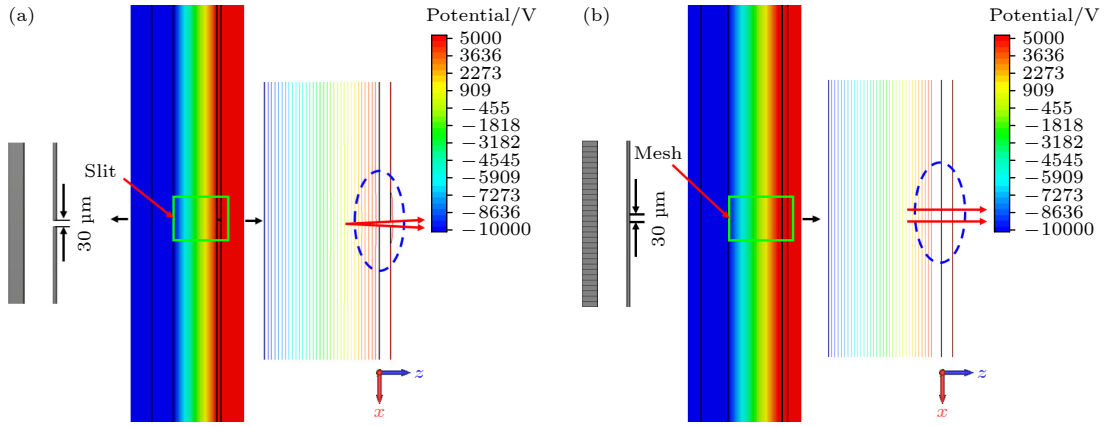


图 1 加速结构对电势的影响 (a) P-S 加速结构; (b) P-M 加速结构

Fig. 1. Influence of the accelerating electrode on potential distribution: (a) P-S accelerating electrode; (b) P-M accelerating electrode.

电极的间距为 1 mm, 加速电压为 15 kV. 常见的加速电极有栅网结构和狭缝结构^[11,12]. 图 1(a) 为平面结构光阴极及狭缝型加速栅极结构 (P-S 加速结构) 电势分布图, 在加速电极窄狭缝处, 等势线由光阴极凸出加速狭缝. 当电子束的部分电子位置信息满足 $x > 0$ 时, 电子脉冲出射加速狭缝向 x 正向运动, 反之出现的部分电子向 x 负向运动. 可见, 狭缝加速电极会引起电子脉冲沿扫描方向的横向空间弥散, 降低空间分辨特性. 图 1(b) 为平面结构光阴极及高精度加速栅网结构 (P-M 加速结构) 电势分布图, 光阴极和加速栅网间形成近似平行的等势线, 其高牵引场强对光电子束均匀加速, 且几乎不会对电子束造成横向扩散.

飞秒条纹管的亮度增益与电子光学系统透射比呈一次线性关系. 因此在设计中应尽量提高光电子的透过率. 鉴于非扫描模式下荧光屏上扫描方向的电子束斑长度 l_b 对技术时间弥散 Δt_{tech} 的影响, 取电子源尺寸为 $4 \text{ mm} \times 10 \text{ }\mu\text{m}$, 发射 10000 个光电子研究加速电极的透射率, 如图 2 所示. 在 P-S 加速结构中, 当狭缝栅极的宽度 $d_s \leq 20 \text{ }\mu\text{m}$ 时, 受狭缝边缘电场的影响, 部分光电子被狭缝电极截获; 当 $d_s \geq 20 \text{ }\mu\text{m}$ 时, 光电子的透过率可达 100%. 在 P-M 加速结构中, 设置网格与网格线宽度之比为 1:1, 沿扫描方向电子脉冲宽度 d_e 小于栅网宽度 d_s , 对光电子透过率影响较小, 但狭缝方向电子源宽度较长, 受网格影响较大. 由图 2(b) 可知, 对于 P-M 加速结构, 当 $d_m \leq 20 \text{ }\mu\text{m}$ 时, 光电子的透过率低于 50%; 当 $d_m \geq 20 \text{ }\mu\text{m}$ 时, 电子透过率随 d_m 的增大而增大, 但基本保持在 50%. 对于 P-S 加速结

构, 电子透过率随 d_s 有相同的变化趋势, 但当 $d_s \geq 30 \text{ }\mu\text{m}$ 时, 电子的传递效率为 100%, 即所有的光电子均可通过加速电极进行成像. 考虑飞秒条纹管的阳极电子入口处设置有电子准直狭缝, 可以减小光电子沿扫描方向的空间弥散, 因此飞秒管采用狭缝型加速电极以获得较高的光子效率.

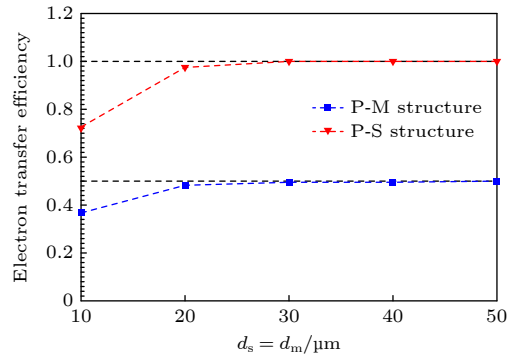


图 2 加速结构对电子透过率的影响

Fig. 2. Influence of the accelerating electrode on electron transmittance.

2.4 各向异性聚焦电极及阳极结构设计

空间电荷效应引起的时间弥散是实现百飞秒量级时间分辨条纹管的一大瓶颈, 尤其是在超快光脉冲诊断中, 当瞬态光强度很高时会增大光电子流密度, 空间电荷效应引起的纵向时间展宽将恶化时间分辨率, 横向空间展宽会严重制约空间分辨率^[13]. 为此, 本文采用两组相互垂直的各向异性板状聚焦电极系统, 其中时间聚焦板状电极放置在加速电极与阳极之间, 用于形成沿扫描方向的一维静电场; 空间聚焦板状电极放置于扫描偏转系统与荧

光探测屏之间,能够形成沿空间方向分布的一维静电场,空间方向聚焦系统靠近荧光屏放置也有助于推后电子束沿空间方向的交叉点,减小电子流密度较大情况下的渡越时间,进而减小空间电荷效应引起的时间弥散.另外,板状电极具有加工简单、易于装配的优点.此外,根据 2.1 节讨论,技术时间分辨弥散与电子斑在荧光屏上沿扫描方向宽度成一次线性关系,因此在板状阳极的电子出射方向设置一窄狭缝,可用于截获大角度电子.需要合理设计优化狭缝沿扫描方向的宽度,使狭缝边缘发散场强度最小且荧光屏上电子斑沿扫描方向的尺寸较小.图 3 为电子斑沿扫描方向尺寸及电子透过率与狭缝宽度之间的关系.阳极狭缝宽度越小,荧光屏电子斑的宽度越小,越容易实现飞秒量级时间分辨.但是,窄狭缝一方面会引起电子透过率降低,另一方面会增强沿扫描方向的扩散场,进而恶化电子斑的宽度.

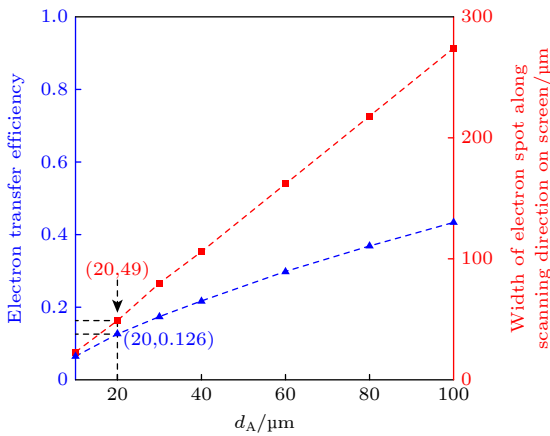


图 3 狭缝宽度对电子斑的影响,蓝色拟合曲线表示电子转移效率,红色拟合曲线表示屏幕上沿扫描方向的电子斑点宽度

Fig. 3. Variation of electron transfer efficiency and width of electron spot along scanning direction on screen with width of anode. The blue fitted curve represents the electron transfer efficiency, and the red fitted curve represents the width electron spot along scanning direction on screen.

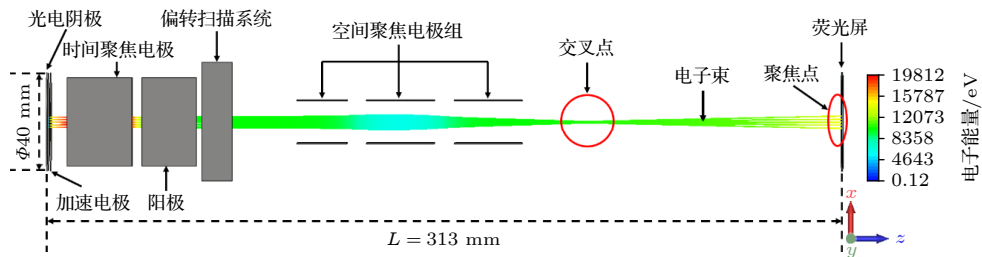


图 4 飞秒条纹管结构示意图

Fig. 4. Schematic diagram of the femtosecond streak tube.

3 时空特性

3.1 飞秒条纹管结构及电势分布图

基于以上对电极结构的研究,进一步仿真分析了百 fs 量级时间分辨条纹管的内部电势分布及电子束特性.该飞秒条纹管模型结构如图 4 所示,主要由光阴极、加速电极、时间聚焦电极、阳极组、扫描偏转系统、空间聚焦电极组及荧光屏组成.此结构中,加速电极采用宽度为 30 μm 的窄狭缝平面结构,阳极狭缝宽度可调节.该条纹管结构紧凑,尺寸仅为 $\Phi 60 \text{ mm} \times 313 \text{ mm}$.模型建立之后采用有限积分法计算电磁场分布.网格是电磁能量在空间分辨率上的体现,网格越精密,计算精度越高,但仿真时间会相应增加,反之亦然.模型计算过程中采用自适应网格加密技术完成模型网格剖分.图 5(a), (b) 所示为飞秒条纹管沿子午面和弧矢面的电势分布图.获得电磁场分布之后,采用离散化的洛伦兹力定律计算电子运行轨迹,图 4 还显示了从光阴极不同位置发射的电子的运行轨迹,其交叉点位于空间聚焦电极组与荧光屏之间,聚焦点位于荧光屏处.

3.2 静态空间分辨特性

为评估飞秒管在整个阴极范围内的静态空间分辨特性,在光阴极内表面沿狭缝方向每间隔 1 mm 发射一束电子.鉴于阳极电子准直狭缝的电子透过率较低,因此阴极发射的每个电子波包各包含 30000 个电子,并追踪电子轨迹.由于光阴极发射光电子在初始能量、初始方位角以及初始位置分布方面均存在不同,经过飞秒条纹管电子光学系统之后产生纵向时间展宽效应.图 6 所示为阴极不同位置处发射的无初时间弥散的电子束到达最佳像面(荧光屏)处的空间调制传递函数.从图 6

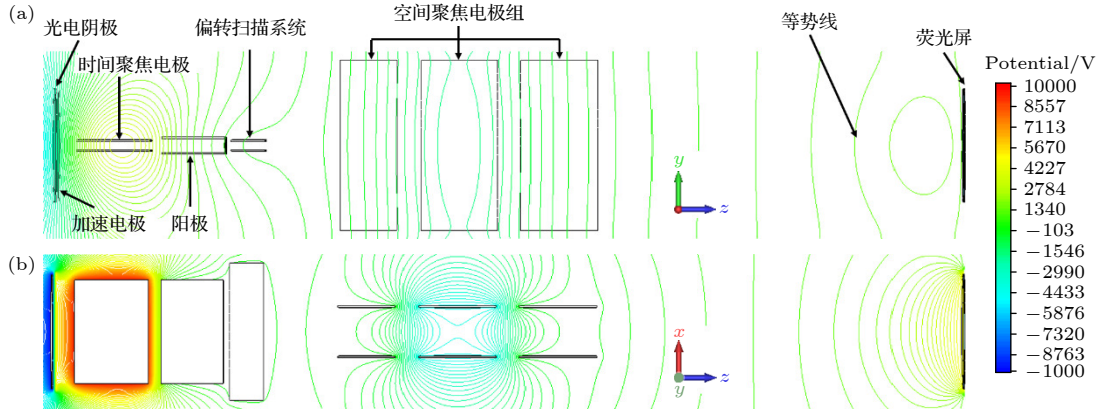


图 5 飞秒条纹管内部电势分布 (a) 子午面电势分布; (b) 弧矢面电势分布

Fig. 5. Distribution of potential in the femtosecond streak tube: (a) On the meridian direction plane; (b) on the sagittal direction plane.

可以看出, 在阴极有效探测长度 4 mm 的范围内, 静态空间分辨率高于 100 lp/mm @MTF = 10%; 即使在距离阴极中心 ± 4 mm 的位置处, 静态空间分辨率仍高于 30 lp/mm @MTF = 10%, 且在离轴正、负对称的位置, 空间调制传递函数趋于一致, 这主要归因于飞秒条纹管结构对称。

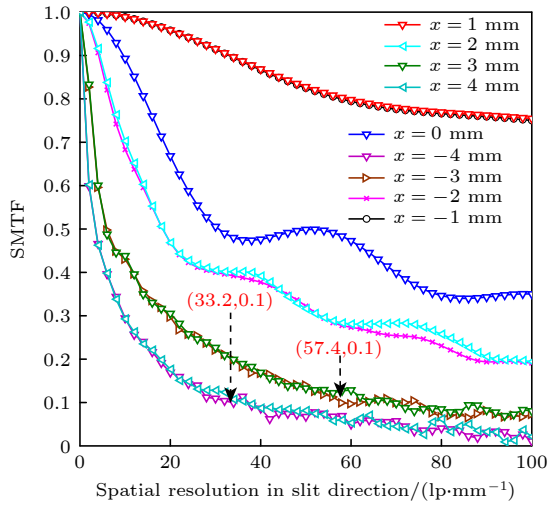


图 6 离轴不同距离处发射的电子束的静态空间调制传递函数 (S-SMTF)

Fig. 6. S-SMTF of the electrons emitted from different off-axis distance.

3.3 扫描偏转电压

飞秒条纹管实现飞秒级时间分辨的核心是通过飞秒条纹变像管内的扫描偏转系统 (扫描速度可高达 $2c-3c$), 将飞秒时间间隔的电子脉冲转变为空间上从上到下 (荧光屏上沿扫描方向) 依次排列的空间图像信息. 因此, 评估飞秒条纹管的动态特性时, 需要给扫描偏转板施加高线性度的斜坡扫描

信号. 在扫描偏转板的入口处定义两个对称放置的电压源离散端口, 在偏转板出口处定义两个对称放置的阻值为 50Ω 的匹配阻抗, 扫描信号最后耗散在匹配阻抗中, 如图 7(a) 所示 (红色箭头表示离散端口方向, 蓝色箭头表示匹配阻抗方向). 施加在扫描偏转板上的预偏电压为 67 V, 高线性斜坡扫描信号如图 7(b) 所示, 扫描速度为 $2.1c$. 不同时间到达偏转板的光电子脉冲经扫描信号和预偏电压共同作用之后, 成像在荧光屏中心位置. 假设光电阴极受光照的时刻为 $t = 0$ ps, 则光电子在 $t = 910$ ps 时刻进入扫描偏转板, 并于 $t = 1190$ ps 时刻出射偏转板.

3.4 动态时间特性分析

飞秒条纹管实验中可采用 800 nm 的激光辐照 S-20 光阴极, 出射的光电子既具有统计性, 又具有涨落性. 统计性给出了有用信息, 使本测量结果具有意义. 而涨落性则产生了噪声, 会恶化甚至无效化测量结果 [14]. 在评估空间分辨特性时, 忽略光电子束的初始时间分布, 假定所有电子在 $t = 0$ 时刻从阴极出射, 初始角度分布为余弦分布, 位置分布为均匀分布; 此外, 根据 S-20 光阴极的功函数可知能量半高宽度为 0.1 eV, 能量服从 $\beta(1, 4)$ 分布. 在评估有效光阴极内的时间分辨特性时, 考虑激光脉冲辐照整个光阴极 $4 \text{ mm} \times 100 \mu\text{m}$ 有效区域. 因此, 从光电阴极发射横向空间尺寸为 $4 \text{ mm} \times 100 \mu\text{m}$ 的 4 束电子脉冲, 脉冲间隔分别为 860 fs, 1040 fs, 860 fs, 半高全宽为 0.5 fs. 其中光电子脉冲的时间分布及能量分布如图 8 所示. 经扫描偏转信号扫描后 4 束电子脉冲在荧光屏上的空间分布如图 9(a)

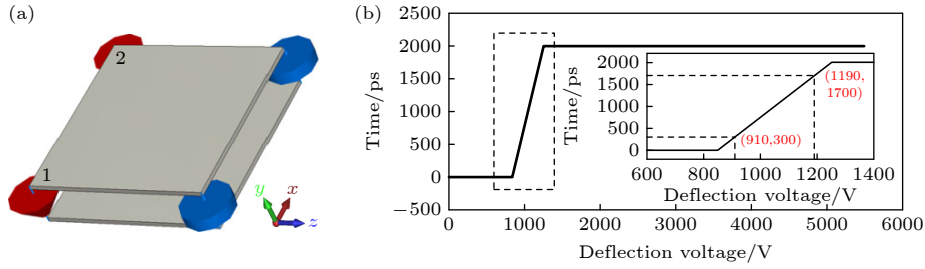


图 7 扫描偏转系统 (a) 扫描偏转板端口设置; (b) 高线性斜坡扫描信号

Fig. 7. Deflection system: (a) The deflection plates settings; (b) swept voltage on the deflection plates.

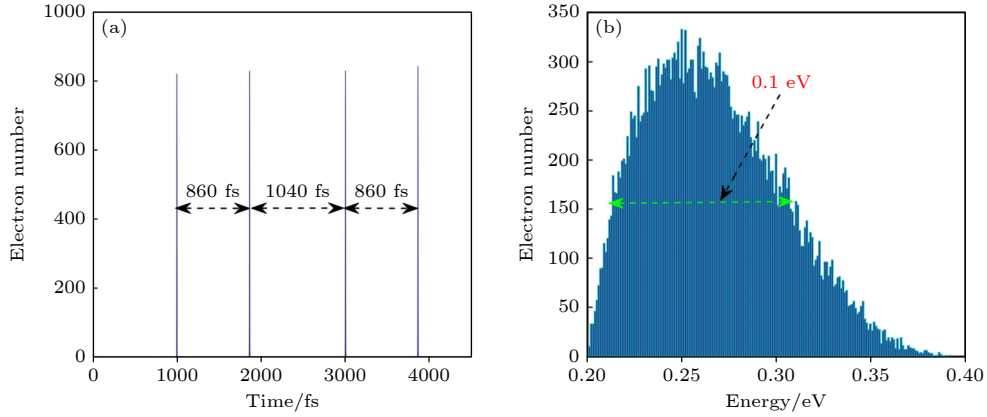


图 8 时间分辨电子源的初始分布 (a) 时间分布; (b) 能量分布.

Fig. 8. Initial distribution of the electron sources: (a) Time distribution; (b) energy distribution.

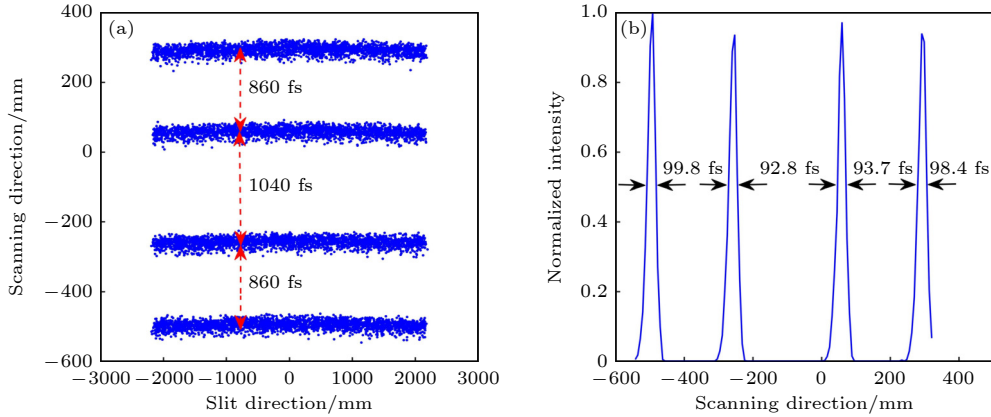


图 9 四束狭缝型电子脉冲的扫描结果 (a) 荧光屏上电子脉冲的束斑分布; (b) 扫描方向电子概率分布曲线

Fig. 9. Sweeping results of four electron pulses: (a) Beam spot of electron pulses on the screen; (b) probability distribution of electrons in scanning direction.

所示. 显然, 4 束电子脉冲无交叠且完全可以分开. 沿扫描方向对电子脉冲进行强度 (数量) 归一化, 得曲线如图 9(b) 所示. 计算得 4 束电子脉冲的半高全宽分别为 99.8 fs, 92.8 fs, 93.7 fs, 98.4 fs, 即飞秒条纹变像管的时间分辨率优于 100 fs.

3.5 动态空间分辨特性

动态扫描工作模式下, 条纹管狭缝方向的空间分辨率反映了条纹管的空间弥散, 扫描方向的空间

分辨率同时反映了条纹管的空间弥散和时间弥散^[15]. 因此为全面评估所设计的飞秒条纹管在整个阴极范围内的动态空间分辨特性, 在阴极内表面沿狭缝方向每间隔 1 mm 的位置发射初始状态服从特性分布的光电子脉冲^[16], 每束电子脉冲包含 30000 个电子, 追踪电子轨迹并统计其在荧光屏上的分布. 采用动态空间调制传递函数法计算其在狭缝方向和扫描方向的动态空间分辨特性, 具体结果如图 10 所示. 鉴于阳极狭缝对大角度电子的截获,

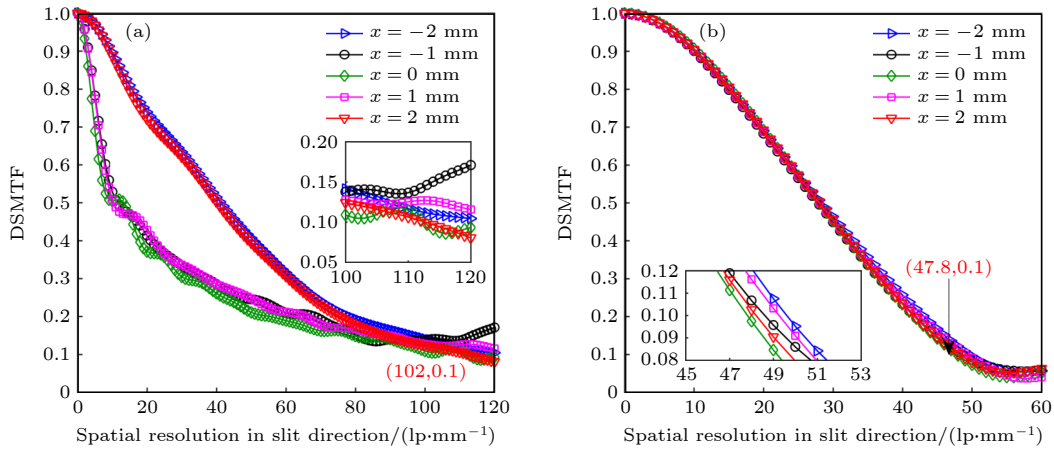


图 10 动态空间调制传递函数 (a) 狭缝方向; (b) 扫描方向

Fig. 10. Dynamic spatial modulation transfer function: (a) Slit direction; (b) scanning direction.

表 1 不同阳极狭缝宽度下飞秒管的时空分辨率

Table 1. Spatio-temporal resolution versus different width of anode slit.

阳极狭缝宽度 $d_{\text{Anode}}/\mu\text{m}$	狭缝方向动态空间分辨率/(lp·mm ⁻¹)	扫描方向动态空间分辨率/(lp·mm ⁻¹)	动态时间分辨率(点源发射)/fs	动态时间分辨率(狭缝发射)/fs
10	245	97	47	82
20	155	71	76	86
30	112	47	84	93
40	92	37	93	103
50	71	29	116	122

整个阴极有效探测范围内的光电子在荧光屏上沿扫描方向的宽度小于 30 μm , 动态空间分辨率高于 45 lp/mm; 空间方向采用单透镜聚焦系统, 鉴于其优越的聚焦特性, 飞秒条纹管沿狭缝方向的空间分辨率高于 100 lp/mm. 因此, 在整个阴极有效探测范围 $\Phi 4$ mm 内, 飞秒管的动态空间分辨率高于 45 lp/mm @MTF=10%.

3.6 阳极狭缝宽度对时空分辨率的影响

为研究不同阳极狭缝宽度时对动态时空分辨率的影响, 设置扫描速度为 $2.1c$. 预偏电压为 134 V, 如此, 光电阴极发射的光电子几乎均可落在荧光屏中心位置. 采用点源(光电子初始能量服从 0—1.5 eV 的 β 分布, 发射仰角服从 0° — 90° 上的余弦分布, 方位角服从 0 — 2π 上的均匀分布, 假设光电子同时从阴极发射, 且忽略电子源的尺寸) 发射计算飞秒管的空间分辨率, 狭缝电子源(脉冲型狭缝电子源尺寸: 4 mm \times 10 μm) 计算阳极狭缝宽度分别为 10, 20, 30, 40, 50 五种情况下, 飞秒管的动态空间分辨率和时间分辨率. 表 1 为不同

阳极狭缝宽度时飞秒管沿扫描方向和狭缝方向的空间分辨率, 以及时间分辨率的计算结果.

表 1 结果显示, 随着阳极狭缝宽度的增大, 时间及空间分辨率都逐渐降低. 时间分辨率降低的原因可以通过 2.1 节时间弥散公式和 2.4 节荧光屏上电子斑沿扫描方向的宽度与阳极狭缝宽度的变化关系解释. 阳极狭缝宽度越大, 扫描方向的电子斑宽度 I_b 越大, 技术时间弥散 Δt_{tech} 越大, 时间分辨率越低. 空间分辨率降低的原因如下: 阴极发射的光电子存在初始能量及初始发射角度弥散, 所以光电子在运行过程中会先散开, 然后在时空聚焦电极的作用下, 逐渐聚焦于荧光屏处. 阳极狭缝越大, 通过的大角度电子数目越多, 光电子在荧光屏上的弥散斑越大, 空间分辨率也越低.

3.7 阴极有效长度对时空分辨率的影响

条纹管的阴极有效探测长度越大, 其时间畸变及狭缝方向的空间畸变就会越大. 时间畸变会导致狭缝像弯曲, 进而恶化时间分辨率; 狭缝方向的空间畸变会降低空间分辨率. 为评估阴极有效探测长

表 2 不同阴极有效长度及阳极狭缝宽度下飞秒管的时空分辨率
Table 2. Spatio-temporal resolution versus different effective cathode length and anode slit width.

类别	性能指标	阳极狭缝宽度 $d_{\text{Anode}}/\mu\text{m}$				
		10	20	30	40	50
阴极有效长度 4 mm	狭缝方向动态空间分辨率/(lp·mm ⁻¹)	245	155	112	92	71
	扫描方向动态空间分辨率/(lp·mm ⁻¹)	97	71	47	37	29
	动态时间分辨率(狭缝发射)/fs	82	86	93	103	122
阴极有效长度 8 mm	狭缝方向动态空间分辨率/(lp·mm ⁻¹)	72	48	33	26	22
	扫描方向动态空间分辨率/(lp·mm ⁻¹)	97	71	47	36	29
	动态时间分辨率(狭缝发射)/fs	166	170	175	184	191

度 4 mm 和 8 mm 情况下的飞秒管性能指标, 本文采用两种不同尺寸的狭缝电子源 (每束电子脉冲包含 15000 个电子, 尺寸分别为: 4 mm×50 μm 和 8 mm×50 μm) 仿真动态时间分辨性能; 采用点源 (每束电子脉冲包含 3000 个电子) 仿真动态空间分辨性能. 表 2 所列为阴极有效探测长度分别为 4 mm 和 8 mm 两种情况下飞秒管的时空性能指标对比. 结果表明: 1) 两种情况下扫描方向的动态空间分辨率几乎无变化. 主要归因于阳极窄狭缝截获了沿扫描方向的大角度电子, 且光电子在等位区沿扫描方向的空间弥散较小. 2) 当阴极有效探测长度增大时, 沿狭缝方向的空间分辨率会严重恶化. 主要归因于光电子离轴距离越大, 沿狭缝方向的空间弥散越大. 3) 阳极窄狭缝宽度越小, 穿过的光电子数目及角度弥散越小, 进而时空弥散越小, 时空分辨率越高.

4 结 论

为设计出百飞秒级时间分辨的条纹管, 理论分析了影响时间分辨率的各个因素并给出了指标要求. 对比分析了两种常见的加速系统结构, 理论分析了两种结构与光电阴极形成的电场分布及电子透过率. 结果表明, 平面阴极-栅网型加速结构虽然能够形成均匀的电场, 但电子透过率较低; 平面阴极-狭缝型加速结构形成的电场分布会使得光电子束沿扫描方向散焦, 但在阴极有效探测范围内的电子透过率高达 100%, 且光电子束的散焦可通过在阳极前设置窄狭缝的方法去除大角度电子. 聚焦电极采用两组垂直放置的板状结构, 时间和空间聚焦板状电极组前后放置, 各自形成沿扫描方向和狭缝方向的一维聚焦电场; 空间聚焦结构靠近荧光屏放

置, 有利于推后电子束沿空间方向的交叉点, 减小电子流密度较大情况下的渡越时间弥散. 同时, 阳极可提供+5000 V 的后加速电压, 有利于缩短光电子脉冲的渡越时间以及渡越时间弥散, 提高时间分辨率. 本文根据上述理论分析, 采用平面阴极-狭缝加速栅极结构、各向异性聚焦结构以及后加速方法, 设计了一种新型飞秒条纹管结构. 数值仿真了阳极狭缝宽度对时空分辨率的影响, 结果表明, 时间分辨率随阳极狭缝宽度 (10—50 μm 范围内) 的增加逐渐恶化, 归因于阳极狭缝宽度的增加会导致电子斑沿扫描方向尺寸的逐渐增大, 进而引起技术时间弥散增大. 此外, 本研究给出了当阳极狭缝宽度变化范围为 10—50 μm 时飞秒条纹管的仿真结果, 在阴极有效探测长度 4 mm 的范围内, 静态空间分辨率高于 100 lp/mm @MTF = 10%, 动态空间分辨率高于 29 lp/mm @MTF = 10%, 时间分辨率优于 122 fs; 当阴极有效探测长度增大至 8 mm 时, 此条纹管的动态空间分辨率高于 22 lp/m @MTF = 10%, 时间分辨率优于 191 fs.

参考文献

- [1] Kassier G H, Haupt K, Erasmus N, Rohwer E G, Bergmann H M, Schwoerer H, Coelho S M M, Auret F D 2010 *Rev. Sci. Instrum.* **81** 105103
- [2] Musumeci P, Moody J T, Scooby C M, Gutierrez M S, Tran T 2009 *Rev. Sci. Instrum.* **80** 013302
- [3] Pei C Q, Wu S L, Luo D, Wen W L, Xun J K, Tian J S, Zhang M R, Chen P, Chen J Z, Liu R 2017 *Nucl. Instrum. Meth. A* **855** 148
- [4] Courtney-Pratt J S 1949 *J. Research: A Journal of Science and its Applications.* **2** 287
- [5] Luo D, Hui D D, Wen W L, Li L L, Xin L W, Zhong Z Y, Ji C, Chen P, He K, Wang X, Tian J S 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 052901 (in Chinese) [罗端, 惠丹丹, 温文龙, 李立立, 辛丽伟, 钟梓源, 吉超, 陈萍, 何凯, 王兴, 田进寿 2020 *物理学报* **69** 052901]
- [6] Tian J 2020 *High Power Laser Part. Beams* **32** 112003 (in

- Chinese) [田进寿 2020 *强激光与粒子束* **32** 112003]
- [7] Gallant P, Forget P, Dorchie F, Jiang Z, Kieffer J C 2000 *Rev. Sci. Instrum.* **71** 3627
- [8] Feng J, Shin H J, Nasiatka J R, et al. 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 134102
- [9] Shakya M M, Chang Z H 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 041103
- [10] Kinoshita K, Ishihara Y, Ai T, Hino S, Inagaki Y, Mori K, Goto M, Niikura F, Takahashi A, Uchiyama K, Abe S 2016 *Proceedings of the 31st International Congress on High-speed Imaging and Photonic* Osaka, Japan, November 7–10, 2016 p305
- [11] Liu X L, Tian J S, Tian L P, Chen P, Zhang M R, Xue Y H, Li Y H, Fang Y M, Xue X Y, Liu B Y, Gou Y S 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 218502 (in Chinese) [柳雪玲, 田进寿, 田丽萍, 陈萍, 张敏睿, 薛彦华, 李亚晖, 方玉嫚, 徐向晏, 刘百玉, 缙永胜 2021 *物理学报* **70** 218502]
- [12] Tian L P, Shen L B, Li L L, Wang X, Chen P, Wang J F, Chen L, Zhao W, Tian J S 2021 *Optik* **242** 166791
- [13] Macphee A G, Dymoke-Bradshaw A K, Hares J D, Gassett J, Hatch B W, Meadowcroft A L, Bell P M, Bradley D K, Datte P S, Landen O L, Palmer N E, Piston K W, Rekow V V, Hilsabeck T J, Kilkenny J D 2016 *Rev. Sci. Instrum.* **87** 11E202
- [14] Tian L P, Shen L B, Chen L, Li L L, Tian J S, Chen P, Zhao W 2021 *Meas. Sci. Rev.* **21** 191
- [15] Hui D D, Tian J S, Wang J F, Lu Y, Wen W L, Xu X Y 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 018502 (in Chinese) [惠丹丹, 田进寿, 王俊锋, 卢裕, 温文龙, 徐向晏 2016 *物理学报* **65** 018502]
- [16] Tian L P, Li L L, Wen W L, Wang X, Chen P, Lu Y, Wang J F, Zhao W, Tian J S 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 188501 (in Chinese) [田丽萍, 李立立, 温文龙, 王兴, 陈萍, 卢裕, 王俊锋, 赵卫, 田进寿 2018 *物理学报* **67** 188501]

100-fs time-resolved streak tube design based on anisotropy and post-acceleration technology*

Tian Li-Ping¹⁾³⁾ Shen Ling-Bin¹⁾³⁾ Chen Ping²⁾ Liu Yu-Zhu³⁾ Chen Lin¹⁾
 Hui Dan-Dan²⁾ Chen Xi-Ru²⁾ Zhao Wei²⁾ Xue Yan-Hua^{2)†} Tian Jin-Shou^{2)‡}

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

2) (*Key Laboratory of Ultra-fast Photoelectric Diagnostics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

3) (*School of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China*)

(Received 24 August 2023; revised manuscript received 20 September 2023)

Abstract

Reducing the space charge effect and the time dispersion caused by the edge field effect of the scanning deflection system is the key to realizing a 100-fs streak tube. In this paper, a novel fs streak tube is proposed and designed. The factors affecting its temporal resolution are analyzed theoretically and the specifications are given. Parameters including the electric field distribution and electron transmittance of the two common acceleration systems (planar cathode-mesh accelerating electrode and planar cathode-slit accelerating electrode) are compared with each other and analyzed theoretically. The results show that although the electric field distribution formed by the planar cathode (mesh accelerating electrode) can form uniform electric field, the electron transmittance is very low; planar cathode-slit accelerating structure will defocus the photoelectron beam along the scanning direction, but the electron transmittance in the effective detection range of the cathode is as high as 100%. The defocusing of the photoelectron beam can be removed by setting a narrow slit in front of the anode. The focusing electrode adopts two sets of plate-like structures which are vertically positioned in front and back to form a one-dimensional focusing electric fields along the scanning direction and the slit direction, respectively. The spatial focusing electrode is arranged close to the phosphor screen, which is beneficial to pushing back the cross-point of the electron beam along the spatial direction. Thus, the electron transit time dispersion in the condition of large electron density will decrease. At the same time, the anode can provide a post-accelerating voltage of +5000 V, which is beneficial to shortening the transit time and dispersion of the photoelectrons, thereby improving the temporal resolution. Based on the above theoretical analysis, a novel femtosecond streak tube is designed by using the planar cathode-slit accelerating electrode, anisotropic focusing system and post-accelerating method. The influence of the anode slit width on the spatial and temporal resolution is simulated. The results show that the temporal resolution deteriorates with the increase of the anode slot width (10–50 μm), due to the fact that the increase of the anode slit width will lead to the gradual increase of the size of the electron spot along the scanning direction, which will lead to the increase of the technical time dispersion. In addition, this study gives the simulation results of the femtosecond streak tube when the anode slit width is in a range of 10–50 μm . The results show that the static spatial resolution is higher than 100 lp/mm at MTF = 10%, dynamic spatial resolution is higher than 29 lp/mm at MTF = 10%, the temporal resolution is better than 122 fs in the range of 4-mm cathode effective detection length. When the effective detection length of the cathode is increased to 8 mm, the dynamic spatial resolution of the streak tube is higher than 22 lp/mm at MTF = 10%, and the temporal resolution is better than 191 fs.

Keywords: anisotropy focusing technology, post-accelerating technology, temporal resolution, femtosecond streak tube

PACS: 85.60.Ha, 85.60.Bt, 42.79.ls, 87.64.ks

DOI: 10.7498/aps.72.20231382

* Project supported by the Nature Science Foundation of the Jiangsu Higher Education Institutions of China (Grant No. 22KJD140003), the Scientific Instrument Developing Project of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. GJJSTD20220006), the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (A) (Grant No. XDA25030900), and the Youth Innovation Promotion Association CAS (Grant No. 2021402).

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

‡ Corresponding author. E-mail: tianjs@opt.ac.cn



基于各向异性及后加速技术的百飞秒时间分辨条纹管设计

田丽萍 沈令斌 陈萍 刘玉柱 陈琳 惠丹丹 陈希儒 赵卫 薛彦华 田进寿

100-fs time-resolved streak tube design based on anisotropy and post-acceleration technology

Tian Li-Ping Shen Ling-Bin Chen Ping Liu Yu-Zhu Chen Lin Hui Dan-Dan Chen Xi-Ru Zhao Wei
Xue Yan-Hua Tian Jin-Shou

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 248502 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20231382

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231382>

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

小型条纹管数值模拟及实验研究

Numerical calculation and experimental study on the small-size streak tube

物理学报. 2018, 67(18): 188501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180643>

基于太赫兹脉冲加速及扫描电子束的高时间分辨探测器

High time-resolution detector based on THz pulse accelerating and scanning electron beam

物理学报. 2022, 71(2): 028501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20210871>

一种高偏转灵敏度同步扫描条纹管

A synchroscan streak tube with high deflection sensitivity

物理学报. 2021, 70(21): 218502 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210814>

光电倍增管时间测量误差补偿方法研究

Method of compensating for time measurement error of photomultiplier tube

物理学报. 2022, 71(22): 222901 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221193>

基于多路放大器加法电路噪声抑制的热声成像技术

Thermoacoustic imaging based on noise suppression of multi-channel amplifier and additive circuit

物理学报. 2020, 69(24): 240701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201036>

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>