



应用于激光聚变的X射线分幅成像技术

蔡厚智, 邓莹, 罗秋燕, 杜卓铭, 黄晓雅, 牛丽红, 张敬金, 刘进元, 向利娟*

深圳大学物理与光电工程学院, 光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室, 深圳 518060

* 联系人, E-mail: xianglijuan@szu.edu.cn

2023-07-08 收稿, 2023-09-24 修回, 2023-09-26 接受, 2023-09-27 网络版发表

国家自然科学基金(11775147, 62001301)、广东省基础与应用基础研究基金(2019A1515011474, 2019A1515110130)和深圳市科技计划(JCYJ20210324095007020, JCYJ20230808105019039, JCYJ20220814133504001)资助

摘要 X射线分幅相机具有高时间分辨能力和二维空间分辨率, 是激光惯性约束聚变(inertial confinement fusion, ICF)实验中重要的超快诊断设备, 常用于获取内爆压缩动态图像等信息. 此外, 该相机也可应用于Z箍缩、X射线激光、同步辐射等研究中进行瞬态信息探测. 传统X射线分幅相机的时间分辨率由0.1 μs 提高至100 ps, 空间分辨率约20 lp/mm, 且实现了工程化及大画幅尺寸. 随着ICF研究的深入, 要求分幅相机时间分辨率优于30 ps. 采用电子束时间放大技术可将分幅相机时间分辨率提高至5 ps. 微电子技术的进步进一步推动了分幅相机的发展. 基于CMOS芯片的单视线分幅成像系统时间分辨率为30 ps、空间分辨率为35 μm . 为了提高抗电磁干扰能力, 最近几年发展出一种全光固体分幅相机. 本文重点阐述了目前实用的微通道板(microchannel plate, MCP)行波选通X射线分幅技术及新型电子束时间放大X射线分幅技术, 并对全固体分幅技术及全光固体分幅技术的未来发展进行了展望.

关键词 惯性约束聚变, 超快诊断, X射线分幅相机, 高时空分辨, 脉冲展宽

X射线分幅相机具有高时间分辨率和二维空间分辨能力, 被广泛应用于激光惯性约束聚变(inertial confinement fusion, ICF)及Z-pinch等实验中对持续时间为纳秒或亚纳秒量级的超快物理过程进行诊断^[1-8]. 在物理实验中, 分幅相机配接针孔阵列, 即可实现X射线二维分幅成像能力, 用于研究黑腔内等离子体运动以及内爆压缩过程等; 配接具有高空间分辨成像能力的Kirkpatrick-Baez (KB)显微镜或曲面晶体, 即可实现二维高空间分辨分幅照相功能, 用于内爆过程中的热斑形貌演化诊断等^[9]. 早期, 分幅相机采用控制栅极快门式变像管获得分幅成像. 在光电阴极附近设置一个选通栅极, 在选通栅极上加载快门脉冲, 控制光电子通过栅极, 然后采用聚焦极将光电子从阴极成像至荧光屏, 同时在偏转板上加载台阶波形电压, 将不同时刻产生

的光电子图像成像至荧光屏不同位置, 从而实现分幅成像. 1957年, 美国Stoudenheimer等人研制出RCA C73435型控制栅极快门式变像管, 其曝光时间为0.1~10 μs 可调, 静态空间分辨率为22 lp/mm^[5]. 法国Chanler等人研制的OBD1105型高速摄影变像管^[6]、苏联研制的3C-1型变像管、我国研制的JTG305型变像管^[7], 均采用了类似结构. 栅极快门式分幅相机的曝光时间和重复频率具有独立性, 但是对快门脉冲波形及上升沿要求较高, 且有图像畸变、曝光时间和画幅间隔较长等缺点, 因此其应用受到限制. 1976年, 美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)成功研制出一种曝光时间优于100 ps的分解型分幅变像管^[8], 其基本原理是将二维图像由狭缝扫描分解成电子线阵序列, 再重建恢复为二维图

引用格式: 蔡厚智, 邓莹, 罗秋燕, 等. 应用于激光聚变的X射线分幅成像技术. 科学通报, 2023, 68: 4692-4703

Cai H Z, Deng X, Luo Q Y, et al. X-ray framing imaging technique applied in laser fusion (in Chinese). Chin Sci Bull, 2023, 68: 4692-4703, doi: [10.1360/TB-2023-0671](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0671)

像。1990年,中国科学院西安光学精密机械研究所研制成曝光时间为170 ps、空间分辨率为5 lp/mm的扫描式分幅变像管^[10]。在阴极面利用光学分幅获得两幅图像,然后采用偏转快门分幅获得四幅图像。扫描分幅管管型结构较为复杂,动态范围小(20~30),且对各级板电压波形及相位要求较高。

近贴式阴极选通分幅相机在光电阴极和微通道板(microchannel plate, MCP)间加正高压脉冲进行选通,在选通脉冲持续时间内有光电子通过MCP获得倍增电子并轰击荧光屏形成可见光图像,曝光时间为矩形脉冲的宽度。由于MCP体电阻较大,且MCP与光电阴极间的等效电容较大,使得该管型的曝光时间较长,约为2~10 ns。1972年, Lieber^[11]提出了时间分辨率优于1 ns、空间分辨率为9 lp/mm的基于MCP的双近贴聚焦结构变像管。该变像管具有结构小巧、增益高、工作电压低、限制强光、成像面积大、像质均匀、无空间畸变、对快门脉冲要求较低和空间分辨率高等优点,但只能成一幅图像。随着MCP的发展及皮秒高压电脉冲技术的突破, Eckart等人^[12]于1986年提出MCP行波选通分幅成像技术。在MCP输入面镀上微带线,使其两端面形成微带传输线结构,皮秒高压脉冲在微带线上传输时将依次选通光电子成像区域,从而获得具有不同时间的多幅图像。1988年,美国LLNL研制出曝光时间为150 ps的微带选通型X射线分幅相机^[13,14]。1989年,采用单弯曲微带线设计分幅相机,时间分辨率达到100 ps^[15]。同年,英国St Andrews大学也研制了曝光时间为100 ps、空间分辨率为8 lp/mm的四分幅相机^[16]。1990年, LLNL研制出曝光时间为35 ps的门控MCP分幅相机,该相机采用厚度为0.2 mm的薄MCP。1992年, LLNL研制出一种带滤波片组的12分幅相机,每幅图像曝光时间优于100 ps^[17,18]。同年, LLNL还研制出一种成像面积较大的短脉冲分幅相机^[19],可同时获得16幅图像,其快门时间优于40 ps。1994年,我国研制出单弯曲微带X射线分幅相机,每幅曝光时间为100 ps,空间分辨率可达20~25 lp/mm,可进行时、空、能三维分辨联合测量。该相机已经成功应用于我国ICF和Z-pinch研究中,并获得了大量的实验结果^[20~23]。为了进一步提高时间分辨率,美国LLNL于2010年提出将电子束时间放大技术引入到分幅相机,将时间分辨率提高至5 ps。该相机利用电子束时间放大系统对电子束的时间宽度进行展宽,实现电子束的时间放大,然后使用MCP选通分幅变像管对展宽后的电子束进行测量,从而提高时间分

辨率^[24]。本文将重点阐述MCP行波选通X射线分幅技术及电子束时间放大X射线分幅技术,并对全固体分幅技术及全光固体分幅技术的未来发展进行展望。

1 MCP行波选通分幅技术

MCP行波选通分幅相机主要由MCP变像管、选通脉冲发生器和电荷耦合元件(charge-coupled device, CCD)组成。MCP变像管由微带阴极、MCP和制作在光纤面板上的荧光屏组成。用于ICF实验进行等离子体时空分辨诊断时,分幅相机需要配接成像系统(针孔阵列、KB显微镜或曲面晶体等)组合成X射线分幅成像诊断系统。MCP行波选通分幅相机工作原理示意图如图1(a)所示^[23],被拍摄目标(即等离子体的X射线图像)经针孔阵列(如4×4)以小孔成像的原理同时在MCP微带阴极的不同区域产生多幅(4×4幅)光电子图像。宽度为百皮秒的选通电脉冲通过以MCP为电介质的微带阴极加载在MCP上,并沿微带阴极在MCP上以行波方式进行传输,传输速度约为光速的0.6倍。当光电子图像与选通脉冲不同步时,这些光电子图像将被MCP吸收,在变像管荧光屏上没有图像输出;当X射线图像与选通脉冲同步时,由于选通脉冲时间宽度短,某一时刻仅一段微带区域有电压,在该区域的某一幅光电子图像将被MCP增强,并到达荧光屏形成可见光图像。此时,由于其他区域无选通脉冲电压,将无图像输出。经过一段传输时间后,选通脉冲到达另一幅光电子图像所在区域,此时该图像再被MCP增强并输出。这样,这些光电子图像将在不同时刻依次被选通、增益并输出,最终形成多幅(16幅)对应不同时刻的图像。输出的可见光图像用紧贴在光纤面板上的CCD进行记录处理。

MCP行波选通分幅技术提出至今,在ICF实验中获得广泛应用。激光等离子体运动速度通常为 10^7 cm/s,高速运动在曝光时间内会造成图像模糊。要获得清晰等离子体动态图像,要求由成像系统与分幅相机组合而成的X射线分幅成像诊断系统的时间分辨率优于100 ps、空间分辨率优于10 μ m。成像系统的空间放大倍率一般在10倍以上,因此X射线分幅相机的空间分辨率需优于100 μ m。1988年,美国LLNL将曝光时间为150 ps的行波选通X射线分幅相机成功应用于NOVA装置,对ICF靶丸内爆动力学特性进行了研究,成功测量到直接驱动充DT气体玻璃球靶内爆中子发射图,其空间分辨率为80 μ m^[13,14]。1995年,该类相机应用于美国OMEGA激光ICF实验,获得了从激光辐照靶壳初期到

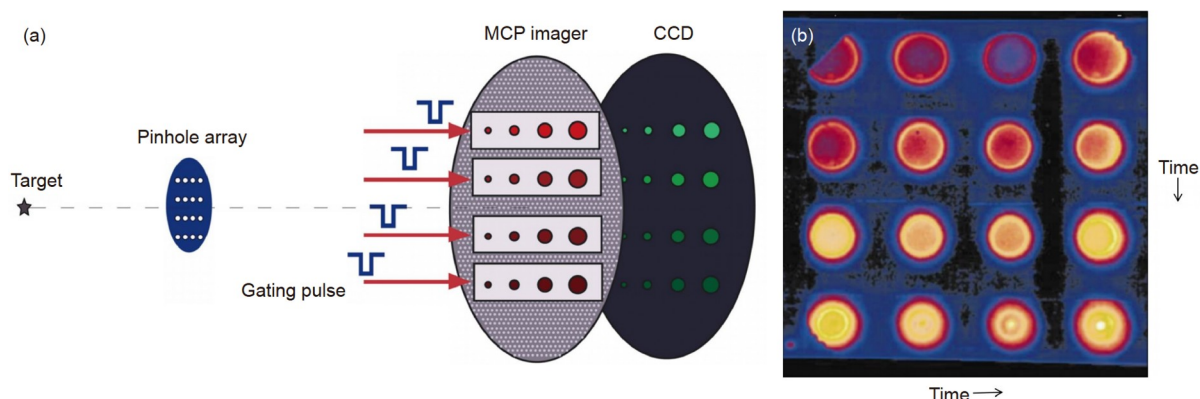


图1 四通道MCP选通分幅相机。(a) 工作原理示意图^[23]；(b) ICF实验X射线针孔成像图^[25]
Figure 1 Four-strip MCP gated X-ray framing camera. (a) Schematic diagram of the working principle^[23]; (b) X-ray pinhole images of the ICF experiment^[25]

热斑形成这一过程的内爆“运动”X射线针孔成像图，如图1(b)所示^[25]，每个图像时间分辨率为50 ps，整个“运动”时间为3.2 ns。

中国工程物理研究院、中国科学院西安光学精密机械研究所和深圳大学等对MCP行波选通分幅技术进行了研究，并将MCP行波选通分幅相机应用于星光系列和神光系列等装置进行实验，获得了大量重要的实验数据^[26]。1996年，时间分辨率为60~100 ps、空间分辨率为15 lp/mm的X射线分幅相机成功应用于“星光”装置，于激光打靶现场测试了相机时间分辨率^[27]。同年，在“神光II”装置，首次将我国研制的首台MCP选通X射线皮秒分幅相机应用于ICF激光等离子体物理诊断，在1.2 ns内连续拍摄到激光注入孔等离子体辐射随时间变化的12幅二维空间分布图像，并获得了等离子体喷射空间尺度随时间的变化过程^[21]。MCP行波选通分幅相机也常用于定量测量Z-pinch等离子体X射线图像，通过测量荧光屏电流来定量测量X射线源强度。由于MCP总电子输出与入射X射线强度和记录图像的强度成正比，利用该系统可观察等离子体演化^[28]。

由于受到MCP中电子渡越时间弥散的限制，MCP行波选通分幅相机的时间分辨率一直无法取得突破性进展。实用化选通分幅相机时间分辨率维持在60~100 ps^[26]，研究人员提出多种方案来提高MCP选通型分幅相机时间分辨率。2007年，中国科学院西安光学精密机械研究所研制了一种时间分辨率为30~40 ps的双MCP双选通型软X射线分幅相机，该相机采用两块厚度为0.5 mm的MCP，近贴放置成“V”形结构。用两列高压脉冲依次选通两块级联的MCP，通过控制两列脉冲

的延迟时间，利用MCP电子渡越时间效应和非线性增益的相互作用，损失一部分快电子和慢电子来获得比单MCP选通相机更短的曝光时间，将时间分辨率提高至30 ps。其曝光时间、增益和信噪比改善明显，但空间分辨率有所降低^[29]。2018年，深圳大学超快诊断研究团队提出用无增益MCP代替有增益MCP来研制变像管，减小电子在MCP中的渡越时间弥散，从而提高时间分辨率^[30]。有增益与无增益MCP中电子渡越时间弥散理论值分别为42.3和3.9 ps。对无增益MCP选通分幅相机进行了实验测量，当光电阴极由宽度为125 ps和幅值为-1.48 kV的选通脉冲进行驱动时，相机时间分辨率为72 ps^[31]。因此，采用宽度更短、幅值更高的选通脉冲可提高时间分辨率。目前，无增益MCP选通分幅相机的时间分辨率为39 ps。

除时间分辨率外，MCP选通分幅相机的重要性能指标还包括空间分辨率、画幅尺寸和动态增益均匀性等。空间分辨率受到MCP通道直径、荧光屏电压等的限制，一般为20 lp/mm^[26]。随着ICF研究的进展，要求增大分幅相机画幅尺寸、增加事件时间记录长度。增大光电阴极灵敏面可提高上述性能指标^[32,33]。由于MCP比较薄，很难将MCP的灵敏面做大，因此分幅相机通常使用直径56 mm左右的MCP^[28]。若在MCP输入面镀上3条相互独立的直微带阴极，每条微带阴极的长度为40 mm、宽度为6 mm时，则时间记录长度约为0.75 ns，X射线像的大小需在0.5 mm内(假设被拍摄等离子体的X射线像经放大倍数为12的针孔阵列成像在微带阴极上)。2004年，美国Los Alamos National Laboratory (LANL)采用MCP拼接的方法，研制了大尺寸X射线分

幅相机, 将有效探测面积提高至 $105\text{ mm} \times 105\text{ mm}$. 该相机共有6条宽度为 13 mm 的微带线, 其选通脉冲宽度可调范围为 $200\sim 1300\text{ ps}$, 快门时间可调范围 $80\sim 1000\text{ ps}$ ^[32]. 2005年, 美国LLNL研制了微带画幅尺寸达 $50\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 的应用于大画幅成像的X射线分幅相机, 测得其动态增益均匀性为 $6:1$ ^[34]. 中国科学院西安光学精密机械研究所研制的工程化大画幅分幅相机时间分辨率可达 60 ps 、空间分辨率可达 20 lp/mm ^[26]. 2013年, 深圳大学研制了大面积MCP行波选通X射线分幅相机, 在直径为 106 mm 的MCP输入面上镀有6条相互独立的直微带阴极, 每条微带阴极宽度为 12 mm , 微带阴极时间记录长度为 3 ns , 相机时间分辨率为 69 ps 、空间分辨率为 18 lp/mm , 动态增益均匀性为 $8.9:1$ ^[33].

对于应用于NIF等大型的ICF装置, 要求分幅相机模块化及具有远程控制等功能. 在大型ICF装置中, 相机整体处于高真空靶室内部对等离子体进行诊断, 靶室远大于相机的诊断距离, 整个诊断过程需在高真空环境下进行, 靶室内部电磁干扰大且要求相机的热量辐射小. 因而, 该类相机在结构和性能上与以往的分幅相机有较大的不同, 在结构上采用工程化、模块化设计, 并利用PC104对相机进行远程控制. 在ICF诊断实验中, 分幅相机需要放置在专门的诊断仪器搭载平台(diagnostic instrument manipulator, DIM)中, DIM与靶室内真空环境相连, 满足变像管对真空环境的要求, 电控系统、CCD和内嵌式计算机等模块安装于气室内部, 使它们工作于大气环境中以便散热, 相机各模块的状态通过远程控制进行设置并监测. 美国NIF、OMEGA装置, 我国某装置和法国LMJ装置均配置了多类型工程化分幅相机^[35-39]. 2006年, 美国LANL为NIF装置研制了采用远程计算机控制、空间分辨率为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的门控X射线探测器^[35]. 2011年, 深圳大学研制了应用于门控平焦场光栅谱仪系统的单通道宽微带MCP行波选通X射线分幅相机, 微带阴极宽度为 20 mm ^[38], 在结构上采用工程化、模块化和程控化设计, 相机的时间分辨率为 71 ps , 空间分辨率为 20 lp/mm , 动态增益均匀性为 $5.1:1$. 2014年, 法国研制了应用于LMJ装置的X射线分幅相机, 时间分辨率约 100 ps , 空间分辨率优于 $100\text{ }\mu\text{m}$ ^[39]. 2015年, 中国工程物理研究院研制了用于ICF物理实验的气室型高灵敏分幅相机, 由针孔阵列、门控X光分幅变像管、CCD和气室等组成(结构示意图如图2所示), 该相机采用超灵敏探测技术并实现了同视角多能区分幅成像, 曝光时间为 70 ps , 空间分辨率为 $30\text{ }\mu\text{m}$ ^[40,41].

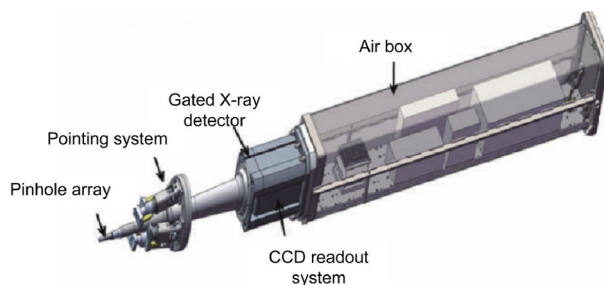


图2 中国工程物理研究院研制的气室型高灵敏分幅相机结构示意图^[40]

Figure 2 Structure diagram of the high sensitive framing camera with an air chamber developed by China Academy of Engineering Physics^[40]

2 电子束时间放大分幅技术

随着美国NIC点火攻关计划的失败, 需要对之前预估过低的不稳定性过程, 尤其是内爆阻滞后期混合状态及热斑形貌等短时间尺度的物理过程($\sim 100\text{ ps}$)开展深入研究. 对此类物理过程进行精细诊断及分析, 要求X射线分幅成像诊断系统时间分辨率优于 30 ps 、空间分辨率优于 $10\text{ }\mu\text{m}$ ^[9]. 电子束时间放大分幅相机是一种将电子脉冲展宽技术与MCP行波选通分幅技术相结合而形成的新型分幅相机. 1976年, Prosser^[42]首次提出电子脉冲展宽技术, 该技术使得电子束团具有较大的速度差, 从而放大电子束团的时间宽度, 将电子探测器的带宽由 250 MHz 提高至 4 GHz . 2010年, 美国LLNL将电子脉冲展宽技术引入到分幅相机, 对输入信号产生的光电子束团进行时间放大, 然后使用MCP变像管对时间放大后电子信号进行取样, 从而将时间分辨率由 80 ps 提高至 5 ps ^[24].

电子束时间放大分幅相机结构示意图如图3(a)所示, 工作原理图如图3(b)所示^[43]. 在电子束展宽技术中, 阴栅之间加载随时间变化的斜坡脉冲, 使得阴极产生光电子速度随发射时间而变化, 产生时间较早的光电子比产生较晚的光电子具有更高的轴向速度, 通过漂移区的传输后, 电子束将在时间上展宽, 时间放大后电子束团再由MCP选通分幅变像管进行取样, 从而提高时间分辨率^[43]. 电子束时间放大分幅相机比传统行波选通分幅相机时间分辨率提高了一个数量级, 并已被应用于NIF装置进行ICF诊断实验^[43-47], 为热斑形貌演化、燃料运动状态和热斑混合程度等深入研究提供了时间分辨率优于 30 ps 的高时空分辨诊断系统^[9].

中国科学院西安光学精密机械研究所于2016年采

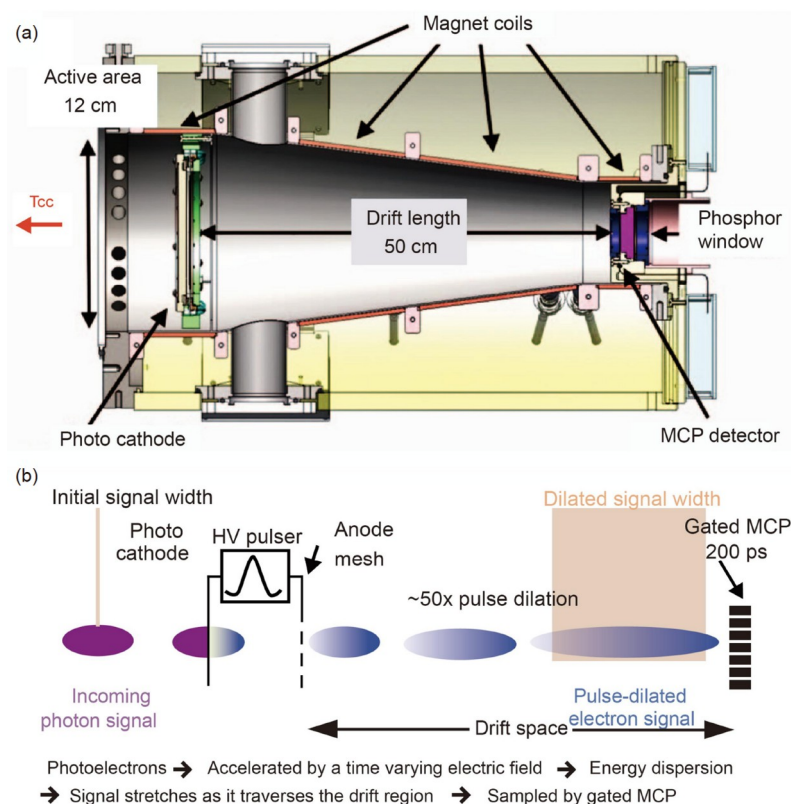


图3 时间放大分幅相机^[43]. (a) 结构示意图; (b) 工作原理示意图

Figure 3 Dilation framing camera^[43]. (a) Structure diagram; (b) schematic diagram of the working principle

用长磁聚焦系统提高漂移管动态空间分辨率, 解决了阴极电压和漂移距离等对系统时间放大倍数的影响等技术问题, 并于2018年研制了多碱阴极可见光响应的长磁聚焦漂移管分幅相机, 其静态空间分辨率为20 lp/mm, 准动态分辨率为14 lp/mm, 时间分辨率为3.3 ps^[26]. 2018年, 中国工程物理研究院研制了模块化和开放式的长磁聚焦漂移管分幅相机.

深圳大学研制了基于短磁透镜聚焦成像的电子束时间放大X射线分幅相机, 其由电子脉冲展宽系统(含光电阴极、阳极栅网和漂移区)、短磁聚焦透镜电子束成像系统、MCP分幅变像管、高压脉冲发生器和CCD等组成^[48], 如图4(a)所示. 采用脉冲展宽技术将电子束时间放大近20倍, 时间分辨率提高至4 ps, 空间分辨率优于100 μm ^[49,50]. 该相机采用大灵敏面X射线光电阴极, 微带阴极长度为90 mm、宽度为12 mm. 阴极脉冲固有延迟时间约为9.35 ns, MCP选通脉冲固有延迟时间约为27.5 ns, 触发晃动率优于85 ps. 阴极脉冲上升沿斜率为3、7、10 V/ps等可选, MCP选通脉冲幅值为-2.3 kV, 宽度约190 ps. 对电子束时间放大X射线分幅

相机时间分辨特性进行理论和实验研究, 验证了时间分辨率随着阴极偏压电压的减小和阴极脉冲斜率的增大而提高的结论^[50]. Cai等人^[49]对阴极脉冲在微带阴极上的传输衰减及其造成的时间分辨率均匀性问题进行了研究. 对阴极脉冲和MCP脉冲同步选通进行研究, 获得了在成像倍率为1:1时两者同步较好、在其他成像倍率时将会有信号损失的结论^[45]. 快门传输效应将造成沿阴极脉冲传输方向窄的条纹图像, 限制了该方向的画幅大小, 如图4(b)~(d)所示. 时间分辨率越高, 沿阴极脉冲传输方向的画幅尺寸越小, 故需要采用双阴极脉冲对向传输方式来增大画幅尺寸^[46]. 快门传输效应也有优点, 即为新型条纹相机提供了一种研究思路, 时间放大分幅相机可利用该效应工作于条纹相机模式. 2017年12月, 由深圳大学研制的电子束时间放大分幅相机应用于中国工程物理研究院的太瓦激光打靶装置, 测量获得相机时间分辨率为9.8 ps, 工作性能稳定, 抗干扰性强, 满足强电磁干扰条件下的激光打靶实验要求.

由于漂移区传输距离较大, 电子束将在空间发散. 为了提高空间分辨率, 需要采用成像系统将展宽后的

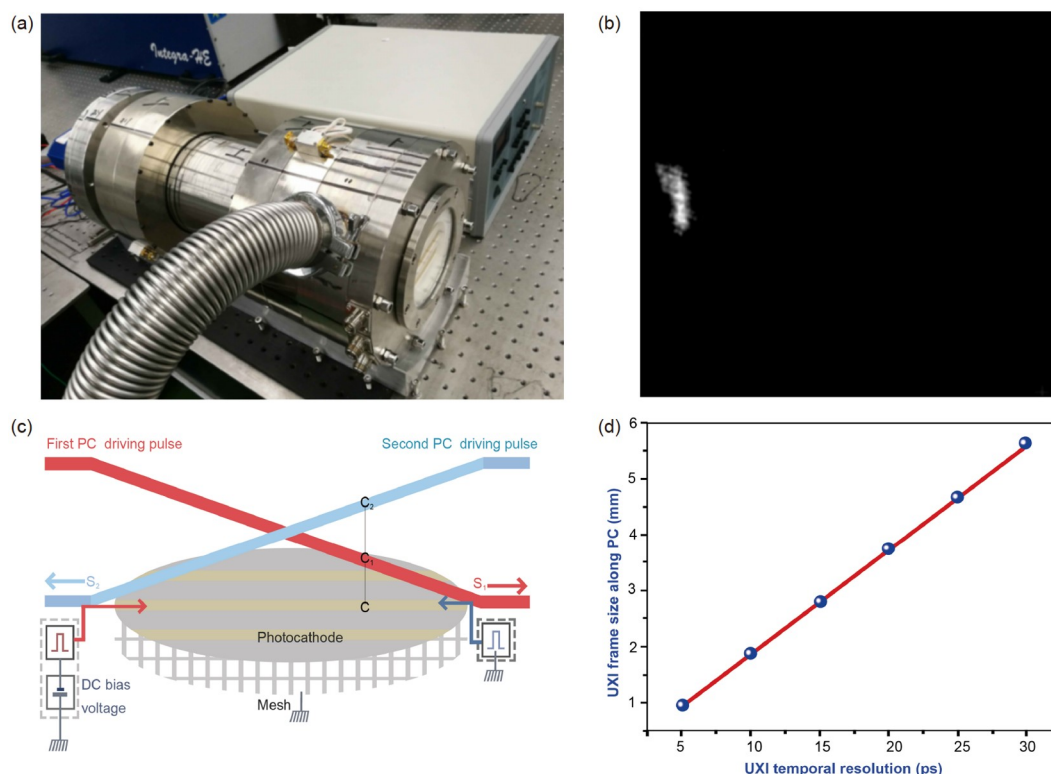


图4 深圳大学研制的电子束时间放大幅相机。(a)实物图^[48]；(b)在太瓦激光打靶装置获得的实验图像；(c)双阴极脉冲对向传输方式增大画幅尺寸示意图；(d)沿阴极脉冲传输方向的画幅尺寸大小与时间分辨率的关系^[46]

Figure 4 Dilation framing camera developed by Shenzhen University. (a) Photograph^[48]；(b) experimental image while it is applied for a terawatt laser targeting device；(c) schematic diagram of the image size increased by two opposite-transmission photocathode pulses；(d) relationship between the frame size along the photocathode pulse transmission direction and the temporal resolution^[46]

电子束成像在MCP输入面对应的微带线上。长磁透镜和短磁透镜是两种实用的电子束成像系统。美国LLNL采用螺线管长磁透镜产生均匀磁场，将微带阴极上的光电子以3:1的成像倍率成像在MCP，获得相机的空间分辨率为 $360\ \mu\text{m}$ ^[43]。中国工程物理研究院与中国科学院西安光学精密机械研究所均采用长磁透镜电子束成像方式。中国科学院西安光学精密机械研究所的相机系统目前静态空间分辨率约 $10\ \text{lp/mm}$ ^[26]。深圳大学采用组合式大口径短磁聚焦透镜电子束成像系统产生轴对称的具有高斯分布的非均匀磁场，获得阴极成像面直径在 $53\ \text{mm}$ 范围内，空间分辨率优于 $10\ \text{lp/mm}$ ^[49,50]。

长磁透镜成像面近似为一平面，而短磁透镜为一曲面，故长磁透镜空间分辨率均匀性较短磁透镜更好。长磁透镜可成像的电子能量变化范围较大，而短磁透镜较小。但长磁透镜需要较大的激励电流，获得 $20\ \text{lp/mm}$ 空间分辨率时，长磁透镜所需安匝数为短磁透镜的80余倍。大电流将造成线圈发热较多，故需要采

用脉冲电流来减小焦耳热的产生。美国LLNL采用幅值为 $1\ \text{kA}$ 和宽度约 $1\sim 10\ \text{ms}$ 的脉冲电流来激励长磁透镜，这类长磁透镜已应用于小尺寸互补金属氧化物半导体(complementary metal-oxide semiconductor, CMOS)芯片。长磁透镜若应用于大面积MCP变像管，将需要更大的安匝数^[51]。短磁透镜可以使用较小的安匝数来获得较高的空间分辨率，并可以通过组合式透镜来减小场区。磁聚焦透镜个数越多，曲面曲率越小，空间分辨率越高，空间分辨率均匀性越好^[52]。空间分辨率在 $20\ \text{lp/mm}$ 以下时，可以采用短磁透镜来实现，空间分辨率要求高于 $20\ \text{lp/mm}$ 时，则采用长磁透镜更佳^[53]。

长磁透镜的优势在于能够获得较好的空间分辨率均匀性。短磁透镜常用于高分辨电子显微镜^[54]，其优势在于能够获得更高的空间分辨率，但场曲较大，空间分辨率均匀性差。为了提高空间分辨率及其均匀性，结合长磁透镜和短磁透镜的优势，将两种透镜组合在一起，形成混合式磁聚焦透镜，如图5所示。混合式磁聚焦透

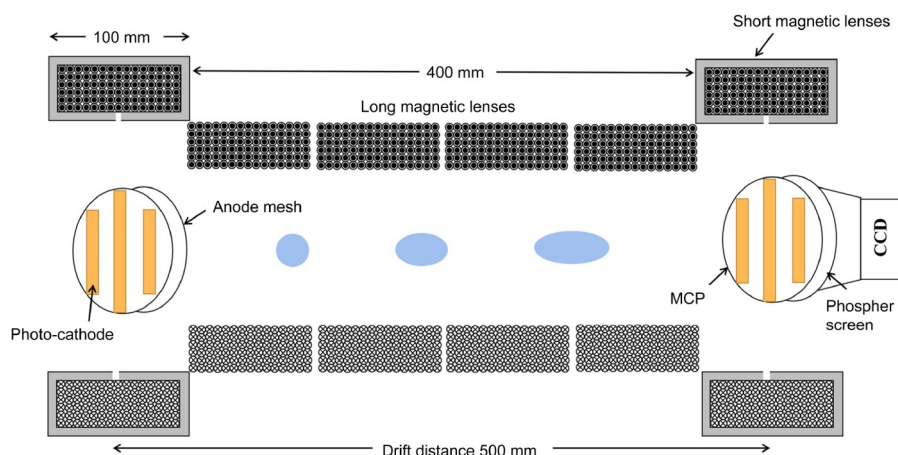


图 5 基于混合式磁透镜的时间放大分幅相机结构示意图^[53]

Figure 5 Schematic diagram of the dilation framing camera based on the hybrid magnetic lens^[53]

镜的成像面近似为一平面, 采用较小的激励电流可获得较高空间分辨率及其均匀性。当成像放大倍率为1:1时, 在阴极成像面直径60 mm范围内, 混合式磁聚焦透镜成像系统的理论空间分辨率优于 $20\ \mu\text{m}$ ^[53]。

3 分幅相机的未来发展之路

基于光电转换的变像管是行波选通分幅相机和时间放大分幅相机的核心部件。空间电荷效应等因素的影响制约了上述相机性能指标的进一步提升。全固体分幅技术因具有皮秒和亚皮秒量级时间分辨率、高空间分辨率、高可靠性和强抗干扰能力等优点, 是超快诊断领域具有发展前景的技术之一^[55]。此外, 光学分幅技术能够适应强电磁和强电离等环境, 也具有发展潜力。

3.1 全固体分幅技术

高能量密度物理实验的诊断需要高时空分辨的分幅相机。随着ICF研究的深入, 希望相机小型化甚至芯片化。此外, 为了能够更加准确地获得被测对象信息, 需要采用单视线(single line-of-sight, SLOS)技术, SLOS技术减少了成像通道数目, 可以避免多通道间视角差异带来的影响, 同时降低了对阴极探测面的要求。近年来, 随着微电子学工艺的提高, X射线CMOS分幅技术发展迅速^[56]。CMOS为一种全固体分幅器件, 可以实现皮秒至纳秒量级的时间分辨率及多分幅成像, 且具有高空间分辨能力^[51]。相比于传统真空变像管分幅相机, X射线CMOS分幅相机具有如下优点: 体积小、

重量轻, 便于和其他光学成像系统集成; 将最外侧绝缘层去掉后, CMOS芯片可以直接探测电子信号, 便于和电子脉冲展宽系统等集成; 可实现SLOS技术等^[57]。

2015年, 美国桑迪亚实验室(Sandia Labs, SNL)研制出时间分辨率为2 ns的超快X射线CMOS成像仪Furi, 其感光灵敏面大小为 $25.6\ \text{mm} \times 11.2\ \text{mm}$, 包含 1024×448 个 $25\ \mu\text{m}$ 像素阵列, 能够获得2分幅图像^[56]。2016年, 美国SNL基于Furi成像仪, 研制出具有2~4分幅图像的CMOS成像仪Hippogriff。2017年, 美国SNL研制出4分幅图像的CMOS成像仪Icarus, 其时间分辨率为2 ns, 空间分辨率为 $25\ \mu\text{m}$, 像素阵列数为 1024×512 , 感光灵敏面为 $25.6\ \text{mm} \times 12.8\ \text{mm}$ ^[58]。深圳大学于2016年研制了时间分辨率为75 ps的单分幅超快CMOS图像传感器^[59]。

2018年, 美国LLNL将电子脉冲展宽系统和hCMOS相结合, 研制出SLOS分幅成像系统^[51], 其工作原理示意图、结构示意图和实物图如图6所示。光电阴极将入射X射线图像转换为电子图像, 电子脉冲展宽系统对电子束团进行时间放大, 时间放大后电子束团在漂移区末端被升压加速并撞击CMOS探测器, CMOS通过门控信号对输入的电子束团进行采样, 从而获得多幅成像。SLOS分幅相机在350 ps左右时间窗口内, 可以成2或4幅图像, 时间分辨率为30 ps, 空间分辨率为 $35\ \mu\text{m}$ ^[51,60]。以hCMOS作为探测器件的新型门控X射线分幅相机, 在国外已经应用于ICF成像, 如SLOS-CBI已安装于NIF, SLOS-TRXI已安装于OMEGA, 未来将朝着更多画面幅数、更高时间分辨率和更大动态范围等方向发展^[40,51,56,59,61]。

3.2 全光固体分幅技术

ICF物理过程持续时间短,如聚变燃烧阶段约100~200 ps,要求诊断系统具有优于30 ps的时间分辨率,同时高聚变中子产额及强电磁辐射环境还要求诊断系统具备强抗干扰能力。全光固体分幅技术在实现ps甚至亚ps量级时间分辨率、高空间分辨率、可靠性和稳定性等方面具有其独特优势^[62]。全光固体分幅相机系统工作原理示意图如图7(a)所示,待探测超快光信号入射到半导体探测晶体形成动态光栅,该瞬态光栅包含待测光信号的时间、空间、强度等信息,然后采用具有时间间隔的探针光序列,从背面照射被信号光激发的半导体探测晶体,序列中的各个探针光脉冲相继“读出”对应时刻的半导体探测晶体内的光栅图像,最后对包含不同时刻信号光信息的探针光序列进行空间展开得到多幅图像,并记录每幅图像对应时刻的光信号^[55]。

2011年,美国LLNL研制出光栅驱动瞬态光学记录仪(grating actuated transient optical recorder, GATOR),该设备利用X射线产生的自由载流子引起半导体光学

折射率的变化,从而将超快探测信号(< 100 fs)转换为光学系统待测图像^[63]。2017年,中国科学院西安光学精密机械研究所提出一种能够进行单次超快成像的新型超快全光学固态分幅相机(ultrafast all-optical solid-state framing camera, UASFC),其结构示意图如图7(b)所示。该相机由超快半导体芯片(ultrafast semiconductor chip, USC)、光学时间序列系统(time-series system, TSS)和空间映射器件(spatial mapping device, SMD)组成^[64]。UASFC在可见光区域的时间分辨率为3 ps,空间分辨率为30 lp/mm。

基于泵浦探测的超快诊断技术已经在可见光和X射线成像获得应用。中国工程物理研究院王峰研究员团队^[9]将传统泵浦探测技术中的泵浦光替换成ICF物理过程中的光源或X射线,设计了基于泵浦源的高时间分辨全光分幅二维成像系统,其结构示意图如图8所示。全光分幅成像技术是一种以成像方式耦合泵浦及探针信号于X射线转换材料,利用多台阶微型反射镜光束进行分割的新型分幅技术,该技术以大动态范围面阵相机作为记录器件。目前该系统时间分辨率优于5 ps,随

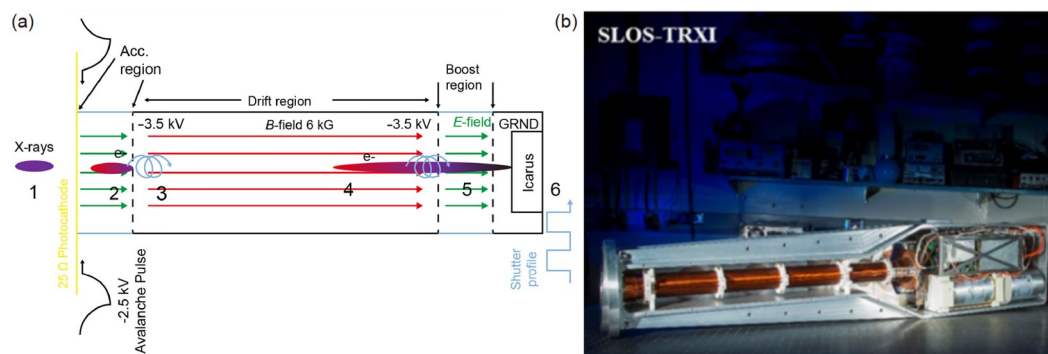


图6 基于hCMOS的单视线分幅成像系统。(a)工作原理示意图;(b) SLOS-TRXI实物图^[51]

Figure 6 SLOS framing imaging system based on hCMOS. (a) Schematic diagram of the working principle; (b) photograph of the SLOS-TRXI instrument^[51]

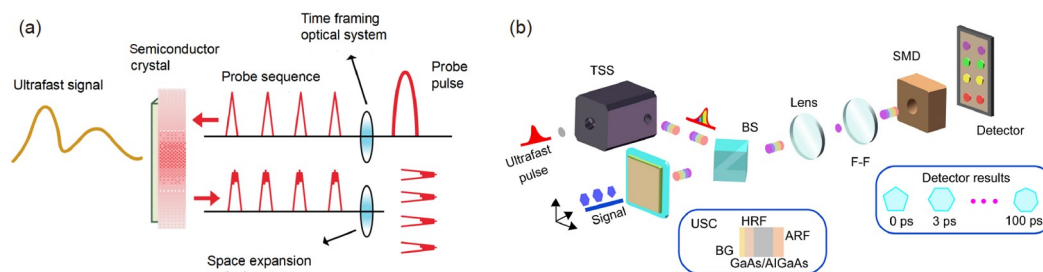


图7 全光固体分幅相机系统。(a)工作原理示意图^[55];(b)中国科学院西安光学精密机械研究所研制的全光学固态分幅相机结构示意图^[64]

Figure 7 All-optical solid framing camera system. (a) Schematic diagram of the working principle^[55]; (b) structure diagram of the all-optical solid-state framing camera developed by Xi'an Institute of Optics and Precision Machinery, Chinese Academy of Sciences^[64]

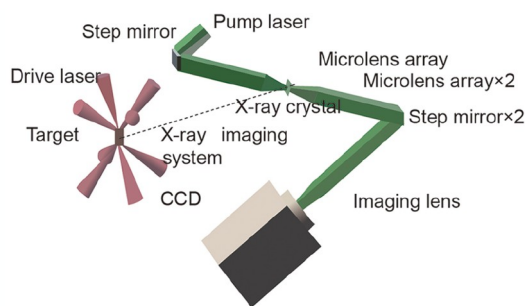


图8 全光分幅成像诊断系统结构示意图^[9]

Figure 8 Structure diagram of the all-optical framing imaging diagnostic system^[9]

着泵浦光脉冲时间宽度的缩短, 其时间分辨率可提高至百飞秒量级. 该系统为全光学光路, 抗电磁干扰能力强, 有望突破ICF诊断中电磁辐射所带来的技术瓶颈.

4 总结

超快诊断是对ICF等离子体密度、温度及其随时间的变化等进行测量的技术, 其测量的数据是分析聚

变过程的重要依据, 西方国家将其作为核心技术, 对我国实施封锁和禁运, 因此需要研究和发我国自主的超快诊断技术. X射线分幅相机可获得等离子体X射线辐射的二维空间分布及其时间特性, 是一种重要的二维超快诊断设备. 从早期的曝光时间约0.1 μs 的控制栅极快门式变像管分幅相机, 到实用化的约100 ps时间分辨率的MCP行波选通分幅相机, 再到新型的约5 ps时间分辨率的电子束时间放大分幅相机, X射线分幅相机时间分辨率一直在提高, 也在ICF实验中获得重要应用. 随着ICF研究的进展, 对其他性能指标的要求也不断提高, 如增大画幅尺寸, 相机工程化、模块化和程控化等. 随着微电子学工艺的提高, 分幅相机朝着小型化和芯片化发展, X射线CMOS分幅技术也更容易实现SLOS成像, 将有望取代真空变像管分幅相机. 基于电子脉冲展宽和hCMOS的SLOS分幅成像系统已获得30 ps的时间分辨率和35 μm 的空间分辨率. 近年来, 全光固体分幅技术也在发展, 将有望为超快现象的精密测量提供一种高时空分辨的单次多幅二维成像方式.

参考文献

- 1 Tollefson J, Gibney E. Nuclear-fusion lab achieves "ignition": What does it mean? *Nature*, 2022, 612: 597–598
- 2 Kramer D. National Ignition Facility earns its name for a second time. *Phys Today*, 2023, 8: 0811a
- 3 Betti R. A milestone in fusion research is reached. *Nat Rev Phys*, 2023, 5: 6–8
- 4 Cai H, Zhang W, Ge F, et al. Simulation and assessment of material mixing in an indirect-drive implosion with a hybrid fluid-PIC code. *Front Phys*, 2023, 11: 1140383
- 5 Schelev M Y, Richardson M C, Alcock A J. Operation of a grid-shuttered image converter tube in the picosecond region. *Rev Sci Instrum*, 1972, 43: 1819–1829
- 6 Yang W Z. Research on dynamic spatiotemporal characteristics and new multi-time resolution diagnostic technology of MCP gated soft X-ray picosecond framing camera for ICF (in Chinese). Doctor Dissertation. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008 [杨文正. ICF用MCP选通软X射线皮秒分幅相机动态时空特性及新型多时间分辨诊断技术研究. 博士学位论文. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2008]
- 7 Niu H B, Song Z X, Ren Y A, et al. A universal shutter image converter (in Chinese). *Opto-mechan Technol*, 1979, 1: 42–55 [牛憨笨, 宋宗贤, 任永安, 等. 一种通用快门变像管. 光机技术, 1979, 1: 42–55]
- 8 Ralph K J, Lamar W C. Ultra-fast framing camera tube. In: *Proceedings of the 13th International Congress on High-Speed Photography*. Tokyo: SPIE, 1978. 447–450
- 9 Wang F, Zhang X, Li Y L, et al. Progress in high time- and space-resolving diagnostic technique for laser-driven inertial confinement fusion (in Chinese). *High Power Laser Particle Beams*, 2020, 32: 16–31 [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. 强激光与粒子束, 2020, 32: 16–31]
- 10 Chang Z H, Hou X, Zhang X Q, et al. Development of picosecond X-ray framing camera. In: *Proceedings of the 19th International Congress on High-Speed Photography and Photonics*. Cambridge: SPIE, 1990. 1358: 614–618
- 11 Lieber A J. Nanosecond gating of proximity focused channel plate intensifiers. *Rev Sci Instrum*, 1972, 43: 104–108
- 12 Eckart M J, Hanks R L, Kilkenny J D, et al. Large-area 200-ps gated microchannel plate detector. *Rev Sci Instrum*, 1986, 57: 2046–2048
- 13 Kilkenny J D, Bell P, Hanks R, et al. High-speed gated X-ray imagers. *Rev Sci Instrum*, 1988, 59: 1793–1796
- 14 Bradley D K, Delettrez J, Jaanimagi P A, et al. X-ray gated images of imploding microballoons. In: *Proceedings of the 32nd Annual Technical Symposium*. San Diego: SPIE, 1989. 981: 176–185

- 15 Bell P, Killenny J, Power G, et al. Multiframe X-ray images from a single meander stripline coated on a microchannel plate. In: Proceedings of the 33rd Annual Technical Symposium. San Diego: SPIE, 1989. 1155: 430–438
- 16 Finch A, Liu Y, Niu H, et al. Development and evaluation of a new femtosecond streak camera. In: Proceedings of the 18th International Congress on High-Speed Photography and Photonics. Xi'an: SPIE, 1989. 406: 622–627
- 17 Bell P, Killenny J, Hanks R, et al. Measurements with a 35-psec gate time microchannel plate camera. In: Proceedings of the 34th Annual Technical Symposium. San Diego: SPIE, 1990. 456: 1346
- 18 Ze F, Kauffman R L, Killenny J D, et al. A new multichannel soft X-ray framing camera for fusion experiments. *Rev Sci Instrum*, 1992, 63: 5124–5126
- 19 Bell P M, Killenny J D, Landen O L, et al. Multiframe X-ray imaging with a large-area 40 ps camera. In: Proceedings of the fourth generation X-ray sources and ultrafast X-ray detectors. San Diego: SPIE, 1993. 1757: 93–99
- 20 Cheng J X, Wen T S, Zhu Z Y, et al. Developing progress of multiframe gated microchannel plate X-ray camera (in Chinese). *Opt Precis Eng*, 1996, 4: 44–48 [成金秀, 温天舒, 朱宗元, 等. MCP选通X射线皮秒分幅相机研制进展. *光学精密工程*, 1996, 4: 44–48]
- 21 Cheng J X, Wen T S, Zhu Z Y, et al. Multiframe gated microchannel plate X-ray camera used in inertial confinement (in Chinese). *High Power Laser Particle Beams*, 1996, 8: 73–77 [成金秀, 温天舒, 朱宗元, 等. MCP选通X射线皮秒分幅相机在ICF中的应用. *强激光与粒子束*, 1996, 8: 73–77]
- 22 Cheng J X, Wen T S, Yang C B, et al. Measurement system of spatiotemporal energy 3D resolution for laser isomerization (in Chinese). *Sci China Ser A-Math*, 1998, 28: 85–89 [成金秀, 温天舒, 杨存榜, 等. 激光等离子体时、空、能三维分辨测试系统. *中国科学(A辑)*, 1998, 28: 85–89]
- 23 Cheng J X, Yang C B, Wen T S, et al. Gated MCP soft X-ray picosecond multi-framing camera (in Chinese). *High Power Laser Ion Beams*, 1999, 11: 596–599 [成金秀, 杨存榜, 温天舒, 等. 门控MCP软X射线皮秒多分幅相机. *强激光与离子束*, 1999, 11: 596–599]
- 24 Hilsabeck T J, Hares J D, Killenny J D, et al. Pulse-dilation enhanced gated optical imager with 5 ps resolution. *Rev Sci Instrum*, 2010, 81: 10E317
- 25 Storm E, Lindl J D, Campbell E M, et al. Progress in laboratory high gain ICF: Prospects for the future. In: Proceedings of the Eighth Session of the International Seminars on Nuclear War. Erice, 1988
- 26 Tian J S. Development of fringe and framing camera (in Chinese). *High Power Laser Particle Beams*, 2020, 32: 36–52 [田进寿. 条纹及分幅相机技术发展概述. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 36–52]
- 27 Shan B, Chang Z H, Liu J Y, et al. Four-channel X-ray MCP traveling-wave selective framing camera (in Chinese). *Acta Photon Sin*, 1997, 26: 449–456 [山冰, 常增虎, 刘进元, 等. 四通道X射线MCP行波选通分幅相机. *光子学报*, 1997, 26: 449–456]
- 28 Cai H Z, Liu J Y, Peng X, et al. Investigation of picosecond X-ray framing camera (in Chinese). *J Shenzhen Univ Sci Eng*, 2012, 29: 123–128 [蔡厚智, 刘进元, 彭翔, 等. X射线皮秒分幅相机的研制. *深圳大学学报(理工版)*, 2012, 29: 123–128]
- 29 Bai X H, Bai Y L, Liu B Y, et al. A kind of 30–40 ps cascade gating X-ray framing camera with chevron MCPs (in Chinese). *Acta Photon Sin*, 2008, 37: 1351–1355 [白晓红, 白永林, 刘白玉, 等. 一种双MCP选通型30–40 ps软X射线分幅相机. *光子学报*, 2008, 37: 1351–1355]
- 30 Zhang K, Cai H Z, Liu J Y. Simulation on temporal and spatial characteristics for the non-gain microchannel plate (in Chinese). *J Shenzhen Univ Sci Eng*, 2018, 35: 500–504 [张珂, 蔡厚智, 刘进元. 无增益微通道板时空特性的模拟研究. *深圳大学学报(理工版)*, 2018, 35: 500–504]
- 31 Cai H, Liu J, Peng X, et al. Note: Non-gain microchannel plate gated framing camera. *Rev Sci Instrum*, 2011, 82: 056102
- 32 Oertel J A, Archuleta T, Bakeman M, et al. A large-format gated X-ray framing camera. In: Proceedings of the Ultrahigh- and High-Speed Photography, Videography and Photonics. San Diego: SPIE, 2004. 5194: 217–222
- 33 Cai H, Liu J, Peng X, et al. Large-format microchannel plate gated framing camera. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A*, 2012, 677: 14–17
- 34 McCarville T, Fulkerson S, Booth R, et al. Gated X-ray intensifier for large format simultaneous imaging. *Rev Sci Instrum*, 2005, 76: 103501
- 35 Oertel J A, Aragonez R, Archuleta T, et al. Gated X-ray detector for the National Ignition Facility. *Rev Sci Instrum*, 2006, 77: 10E308
- 36 Kimbrough J R, Bell P M, Bradley D K, et al. Standard design for National Ignition Facility X-ray streak and framing cameras. *Rev Sci Instrum*, 2010, 81: 10E530
- 37 Kimbrough J R, Bell P M, Christianson G B, et al. National Ignition Facility core X-ray streak camera. *Rev Sci Instrum*, 2001, 72: 748–750
- 38 Cai H Z, Liu J Y, Peng X, et al. Design of an X-ray framing camera with wide microstrip line (in Chinese). *Chin J Lasers*, 2012, 39: 117001 [蔡厚智, 刘进元, 彭翔, 等. 宽微带 X 射线分幅相机的研制. *中国激光*, 2012, 39: 117001]
- 39 Trosseille C, Aubert D, Auger L, et al. Overview of the ARGOS X-ray framing camera for Laser MegaJoule. *Rev Sci Instrum*, 2014, 85: 11D620
- 40 Cao Z R, Yuan Z, Chen T, et al. Progress and plans of X-ray temporal and spatial diagnosis technology of Shenguang facilities (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2018, 48: 065206 [曹柱荣, 袁铮, 陈韬, 等. 神光装置上X射线时空诊断技术概况与展望. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2018, 48: 065206]
- 41 Cao Z R, Wang Q Q, Deng B, et al. Progress of X-ray high-speed photography technology used in laser driven inertial confinement fusion (in Chinese). *High power Laser Particle Beams*, 2020, 32: 49–61 [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. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 49–61]
- 42 Prosser R D. The interpretation of diffraction and interference in terms of energy flow. *Int J Theor Phys*, 1976, 15: 169–180

- 43 Nagel S R, Hilsabeck T J, Bell P M, et al. Dilation X-ray imager a new/faster gated X-ray imager for the NIF. *Rev Sci Instrum*, 2012, 83: 10E116
- 44 Liu J, Niu L, Peng W, et al. Application of a fast electrical pulse in gated multichannel plate camera. *Rev Sci Instrum*, 2007, 78: 055104
- 45 Cai H, Fu W, Wang D, et al. Synchronous gating in dilation X-ray detector without 1:1 image ratio. *Opt Express*, 2019, 27: 12470–12482
- 46 Cai H, Lin K, Luo Q, et al. Two-dimensional ultrafast X-ray imager for inertial confinement fusion diagnosis. *Photonics*, 2022, 9: 287
- 47 Nagel S R, Hilsabeck T J, Bell P M, et al. Investigating high speed phenomena in laser plasma interactions using dilation X-ray imager. *Rev Sci Instrum*, 2014, 85: 11E504
- 48 Cai H Z, Fu W Y, Lei Y F, et al. Temporal and spatial performance of framing camera based on magnetic focusing imaging and electron pulse time dilation (in Chinese). *Laser Optoelectron Progr*, 2018, 55: 070401 [蔡厚智, 付文勇, 雷云飞, 等. 磁聚焦成像电子束时间展宽分幅相机的时空特性. *激光与光电子学进展*, 2018, 55: 070401]
- 49 Cai H, Fu W, Wang D, et al. Dilation X-ray framing camera and its temporal resolution uniformity. *Opt Express*, 2019, 27: 2817–2827
- 50 Cai H, Zhao X, Liu J, et al. Dilation framing camera with 4 ps resolution. *APL Photon*, 2016, 1: 016101
- 51 Engelhorn K, Hilsabeck T J, Kilkenny J, et al. Sub-nanosecond single line-of-sight (SLOS) X-ray imagers. *Rev Sci Instrum*, 2018, 89: 10G123
- 52 Cai H, Fu W, Wang D, et al. Large-format pulse-dilation framing tube with 5 lp/mm spatial resolution. *Optik*, 2019, 185: 441–446
- 53 Luo Q, Lin K, Chen J, et al. Theoretical study of the spatial resolution characteristics of magnetic focusing framing tubes. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2022, 50: 4660–4666
- 54 Konvalina I, Müllerová I. Properties of the cathode lens combined with a focusing magnetic/immersion-magnetic lens. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A*, 2011, 645: 55–59
- 55 Yuan F F. Research on key technologies of all-optical solid ultrafast imaging (in Chinese). Master Dissertation. Changsha: National University of Defense Technology, 2015 [袁芬芳. 全光固体超快成像关键技术研究. 硕士学位论文. 长沙: 国防科学技术大学, 2015]
- 56 Claus L, Fang L, Kay R, et al. An overview of the ultrafast X-ray imager (UXI) program at Sandia Labs. *Proc SPIE*, 2015, 9591: 177–188
- 57 Zong F K, Zhang J J, Lei B G, et al. Design of X-ray framing camera with single perspective (in Chinese). *Acta Opt Sin*, 2017, 37: 289–294 [宗方轲, 张敬金, 雷保国, 等. 单一视角X射线分幅变像管设计. *光学学报*, 2017, 37: 289–294]
- 58 Claus L, Robertson G, Fang L, et al. Initial characterization results of a 1024×448 , 25- μm multi-frame camera with 2 ns integration time for the ultrafast X-ray Imager (UXI) program at Sandia National Laboratories. *Proc SPIE*, 2016, 9966: 105–115
- 59 Zhang F, Niu H. A 75-ps gated CMOS image sensor with low parasitic light sensitivity. *Sensors*, 2016, 16: 999
- 60 Nagel S R, Carpenter A C, Park J, et al. The dilation aided single-line-of-sight X-ray camera for the National Ignition Facility: Characterization and fielding. *Rev Sci Instrum*, 2018, 89: 10G125
- 61 Trosseille C, Nagel S R, Hilsabeck T J. Electron pulse-dilation diagnostic instruments. *Rev Sci Instrum*, 2023, 94: 021102
- 62 Peng B D, Song Y. Pulsed radiation detection technology based on pump-probe method (in Chinese). In: *Proceedings of the Chinese Nuclear Society 2021 Annual Conference*. Vol. 6, 2021 [彭博栋, 宋岩. 泵浦探测型脉冲辐射探测技术的发展. 见: 中国核学会2021年学术年会论文集. 第6册, 2021]
- 63 Baker K, Stewart R, Steele P, et al. An ultrafast X-ray diagnostic suite for burning plasmas. *APS Division of Plasma Physics Meeting Abstracts*, 2011, 53: JO8. 008
- 64 Gao G, He K, Tian J, et al. Ultrafast all-optical solid-state framing camera with picosecond temporal resolution. *Opt Express*, 2017, 25: 8721–8729

Summary for “应用于激光聚变的X射线分幅成像技术”

X-ray framing imaging technique applied in laser fusion

Houzhi Cai, Xuan Deng, Qiuyan Luo, Zhuoming Du, Xiaoya Huang, Lihong Niu, Jingjin Zhang, Jinyuan Liu & Lijuan Xiang*

Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

* Corresponding author, E-mail: xianglijuan@szu.edu.cn

The X-ray framing camera has high temporal resolution and two-dimensional spatial resolution, which is a significant ultrafast diagnostic device in the laser inertial confinement fusion (ICF) experiments. Such cameras are commonly used to obtain information such as implosion compressed dynamic images. In addition, this camera can also be applied for transient information detection in research, such as Z-pinch, X-ray laser, and synchrotron radiation. The temporal resolution of the traditional X-ray framing camera has been improved from 0.1 μs to 100 ps, as well as the achievement of the engineering and large frame size of the cameras. The microchannel plate (MCP) gated X-ray framing camera is a useful traditional X-ray framing camera, which has been developed over the last several decades and contains four basic components, the pinhole array, the MCP imager, the MCP gating pulse generator, and the charge-coupled device (CCD). The pinhole array is placed between the object and the framing camera, producing an array of X-ray images. Then, the X-ray images are converted into electron images and amplified at different times to obtain time-dependent information by using gated MCP. The electrons outputting from the MCP are accelerated onto a phosphor layer to produce intensified visible images of the incident X-ray images. Typically, the temporal resolution of such a camera is 35–100 ps, limited by the transit time and transit time spread of the electron multiplication process taking place in the MCP. With the deepening of the ICF research, the temporal resolution of the framing camera is required to be better than 30 ps. The electron beam dilation technology improves the temporal resolution to 5 ps. The dilation X-ray framing camera dilates the electron signal converted from the incoming X-ray signal. Then the temporal magnified electron signal is sampled by a time-resolved MCP imager to achieve a high time resolution. The electron signal time-dilation unit contains a transmission PC, a grounded anode mesh, and an electron drift tube. A negative high DC voltage plus a dilating pulse are applied on the PC to achieve a time-dependent electric field between the PC and the mesh, which results in electron energy dispersion. The photoelectrons born earlier can acquire larger energy than those later, and they drift faster in the region from the mesh to the MCP. Therefore, the time duration of the electron signal is magnified. Subsequently, the temporal magnified electron signal is sampled by a time-resolved MCP imager. Because of the temporal magnified electron signal, the temporal resolution of the dilation X-ray framing camera is greatly improved. Recently, the progress of microelectronics technology further promotes the development of framing cameras. The single line-of-sight (SLOS) framing imaging system based on CMOS chips achieves a temporal resolution of 30 ps and a spatial resolution of 35 μm . Furthermore, in order to improve the ability to resist electromagnetic interference, an all optical solid-state framing camera has been developed. In this paper, the traditional useful MCP gated X-ray framing technique and the recent dilation X-ray framing technology are both described. Furthermore, the all-solid framing technology and all-optical solid-state framing technology are prospected.

inertial confinement fusion, ultrafast diagnosis, X-ray framing camera, high temporal and spatial resolution, pulse dilation

doi: [10.1360/TB-2023-0671](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0671)