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*

聂勇敢[1)2)] 高梓宸[2)] 佟亚军[2)] 范家东[2)†] 刘功发[1)] 江怀东[2)‡]

1) (中国科学技术大学, 国家同步辐射实验室, 合肥 230029)

2) (上海科技大学, 大科学中心, 上海 201210)

(2024 年 3 月 18 日收到; 2024 年 4 月 22 日收到修改稿)

上海软 X 射线自由电子激光装置 (SXFEL) 是我国首台 X 射线自由电子激光用户装置, 目前建有 2 条波荡器线、2 条光束线以及 5 个实验站. 装置可提供 2—15 nm 波长 (80—620 eV) 的 X 射线脉冲, 用于高时空分辨的前沿科学研究. 利用 XFEL 高亮度、短脉冲和全相干的特性实现单脉冲相干衍射成像, 可以有效地减轻辐射损伤, 提高图像的空间分辨率. SXFEL 设计重复频率为 50 Hz, 实现单脉冲成像的关键在于通过定时系统能够精确地控制 X 射线脉冲到达样品点的时间, 以确保只有一个脉冲被选中用于成像. 同时, 还需要与成像系统的触发进行同步, 以确保成像系统在正确的时间采集 X 射线脉冲与样品作用后的图像. 本文介绍了 SXFEL 单脉冲成像定时的设计与实现. 通过单脉冲成像的结果表明该定时方案能满足在 50 Hz 的 SXFEL 开展单脉冲成像的需求.

关键词: 相干 X 射线衍射成像, X 射线自由电子激光, 单脉冲成像, 定时系统

PACS: 07.05.Fb, 07.05.Dz, 29.85.Fj **DOI:** 10.7498/aps.73.20240383

1 引 言

高分辨率成像是揭示物质精细结构的最有效方法之一. X 射线突出的特点是波长短和穿透能力强, 是无损获取高分辨率成像的理想光源 [1]. X 射线显微成像技术已被广泛应用于二维和三维高分辨率成像 [2]. 随着以同步辐射为代表的先进 X 射线光源的建设, X 射线显微成像技术得到了快速的发展与应用, 成为物理学、材料学和生物学等领域探究微观世界、揭示微观机制的重要工具. 传统 X 射线显微成像方法包括扫描透射 X 射线显微镜、透射全场 X 射线显微镜等, 但 X 射线的聚焦元件的加工质量是限制成像分辨率进一步提升的关键因素 [2].

同步辐射在亮度和相干性方面性能的提升, 促进了一种新型 X 射线无透镜成像方法-相干 X 射线衍射成像 (coherent X-ray diffraction imaging, CDI) 的发展. 因为 CDI 是一种无透镜的成像方法, 理论上成像分辨率与 X 射线聚焦元件无关, 因此理论成像分辨率可以达到原子水平 [3,4]. 同时, 对于相位物体, CDI 不仅可以得到样品的振幅信息, 还可以重构出样品的相位信息 [5], 具有更高的成像衬度. CDI 已经成为同步辐射上解析微观结构的重要方法, 在物理、材料、生命等科学研究中得到广泛应用 [6,7]. 随着高重频、高亮度和高相干的 X 射

* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFA1603703)、中国科学院战略性先导科技专项 (批准号: XDB37040303) 和国家自然科学基金 (批准号: 12335020) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: fanjd@shanghaitech.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: jianghd@shanghaitech.edu.cn

© 2024 中国物理学会 Chinese Physical Society

线自由电子激光 (X-ray free-electron laser, XFEL) 的建设与运行, 基于 CDI 技术的研究进入了新的阶段. XFEL 作为新型的 X 射线光源, 与同步辐射光源形成了优势互补, 具有超高峰值亮度、超短脉冲和空间全相干的特点, 很好地契合了 CDI 对 X 射线光源亮度和相干性的要求. 由于 XFEL 具有非常高的相干性和光子通量, 可以在单个脉冲中捕获样品的结构信息, 而无需进行多次测量或数据累积, 使得 XFEL 在研究动态过程或易受损样品的结构分析中具有明显的优势, 不仅具备从理论上解决 X 射线辐射损伤的问题, 还极大地提高了实验的效率[8,9]. 与飞秒泵浦激光的联合使用, XFEL 单脉冲成像还具备在飞秒时间尺度和纳米空间尺度实现动态结构成像的能力[10]. XFEL 单脉冲成像已经在材料科学和生物科学等不同研究领域被广泛应用于纳米尺度的精细结构研究[1,8,9,11,12].

精密定时已经成为现代大型科学装置中不可或缺的技术, 对于保证装置的稳定运行、科学实验的顺利进行具有重要作用, 也为科学研究和工程技术的发展提供更加可靠的支持. X 射线自由电子激光器、超强超短激光装置、大规模射电望远镜阵列等大科学装置大都为分布式构型, 装置中不同终端设备之间的协同工作需要依靠精确的时序控制和同步触发[13,14]. 定时系统是为装置中的多种被控设备提供特定时序关系的触发信号, 以确保各设备能够按照预定的时间顺序响应触发信号并协同工作. 同时, 定时系统也可以记录各个事件的发生时间, 方便后续的数据分析和故障排查. 在上海软 X 射线自由电子激光 (Shanghai soft X-ray free electron laser, SXFEL) 装置中, 由于 XFEL 各系统的工作原理不同, 收到定时系统的触发信号的时间与各系统实际工作时间存在着延时差异. 因此, 在 XFEL 单脉冲成像实验中, 定时系统需要实现 XFEL 脉冲和样品之间的时间延迟可控, 确保 XFEL 脉冲与样品的交互发生在所需时间点上.

SXFEL 的设计重复频率为 50 Hz[15], 单脉冲成像的关键技术是通过设计的定时系统, 实现 50 Hz 内的 XFEL 单个脉冲、测试样品、探测器设备的同步和延时控制, 以确保一次只能有单个 XFEL 脉冲照射样品并且信息能够被探测器准确地采集和记录下来. 本文提出了一种适用于 SXFEL 相干散射与成像实验站 (coherent scattering and imaging endstation, CSI 实验站) 的单脉冲成像定时的方案与实现方法, 该定时方案能够实现 50 Hz 的 XFEL 单脉冲成像.

2 单脉冲成像定时设计

2.1 定时系统结构和设计

定时系统要能够协调各个设备按照一定的时间顺序有序地工作, 或者确保实验中发生的事件在时间上具有一致性与统一化. 在单脉冲成像实验中, 需要确保不同设备或仪器在特定的时间点操作, 例如探测器的触发、样品台的移动等, 实现单个触发完成多个设备或系统的同步.

XFEL 定时系统采用的技术主要包括事件定时 (event timing) 和白兔定时 (white rabbit, WR)[14]. 事件定时系统由 MRF 开发[16], 并已成功部署在许多加速器设施中, 如 PAL-XFEL[17], SwissFEL[18] 和 LCLS[19]. WR 是 CERN 和 GSI 提出的基于以太网的开源定时技术[20], SXFEL[21] 和 SHINE[22] 等大科学装置的定时系统都基于该技术开发.

由于 SXFEL 各系统工作时序不同, 为了确保各系统能够在正确的时间接收到触发信号并开始工作, 需要对触发信号进行相应的延时调整. 根据 SXFEL 定时系统[21,23,24], CSI 实验站单脉冲成像实验采用 WR 和数字延时发生器 (digital delay and pulse generator, DDG) 设计方案, 能够对实验站触发信号的精确延时控制, 确保各设备在需要的时间点操作, 避免样品受到额外辐射损害, 同时确保脉冲与样品交互的精确性和可重复性, 实现 SXFEL 单脉冲成像.

如图 1 所示, 定时系统的基础硬件设备有 WR 定时主节点、WR 定时交换机、WR 扇出型定时从节点和 DDG. WR 定时主节点接收来自 SXFEL 定时同步系统的外部参考信号. 经 WR 交换机将信号由光纤传到下一级 WR 从节点设备. 扇出型定时从节点输出触发信号给 DDG 设备或直接输出到探测器. CSI 实验站选用的 DDG 为 Berkeley Nucleonics Corporation 的 BNC505 系列 8 通道数字延时/脉冲发生器. BNC505 参数设定后输出信号给探测器或者其他设备. BNC505 可产生 0.001 Hz 到 2 MHz 的脉冲信号, 满足 SXFEL 50 Hz 单脉冲成像的要求.

在 SXFEL 单脉冲成像实验中, 定时系统从 WR 从节点设备中通过硬连接获取信号作为时间

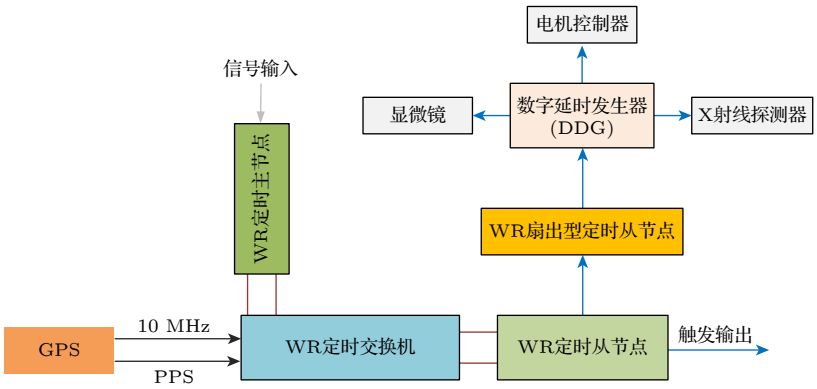

图 1 定时系统硬件结构图: 该定时系统包括两部分——WR 定时系统和数字脉冲延时发生器, DDG 接收 WR 定时信号, 经 DDG 后将特定时序关系的触发信号分发给需要定时的设备 (GPS, 全球定位系统; PPS, 秒脉冲)

Fig. 1. Hardware structure diagram of timing system: This timing system consists of two parts, namely WR timing system and digital delay pulse generator. The DDG receives signals from the WR timing system, and then distributes trigger signals with specific timing relationships to the devices that require timing. GPS, global positioning system; PPS, pulse per second.

基准, 用于时序触发的起始基准, 接入 BNC505 的同步输入端. BNC505 可以提供高达 2 MHz 的具有特定时序关系的脉冲信号, 通过改变触发时间来保证各设备按照设定时间工作.

BNC505 任何通道都可以与外部触发器 (T0)、内部触发器 (也是 T0) 或任何其他通道的边沿 (T1 到 T8) 同步. 依据单脉冲成像对时序的需求, BNC505 应该工作在外部触发模式下, 接收 WR 从节点的预触发信号, 作为每路通道的时序基准参考点 T0. 用示波器测量每一路输出脉冲的时差, BNC505 根据需求调整每一路脉冲信号的延时和脉宽等参数, 保证了每路输出触发信号的精确性, 确保各设备在设定时间接收到触发脉冲.

2.2 单脉冲成像实现

XFEL 脉冲筛选器是一种用于选择 XFEL 脉冲的装置[25]. SXFEL 的基本重复频率为 50 Hz, 对应于脉冲周期 20 ms. 然而, 对于 XFEL 单脉冲成像实验, 最终的工作频率是受到样品台位移速度、探测器最小曝光时间和采集帧率等一系列因素决定的. 这种设备间工作频率的差异造成只能从 SXFEL 工作频率中选择某个 XFEL 脉冲, 而其他脉冲都必须被阻挡, 以确保只有一个 XFEL 脉冲照射样品, 并保护样品免受辐射损伤. 实验站目前采用的探测器是 Teledyne Princeton Instruments 的 PI-MTE3 系列真空 X 射线探测器, 受探测器性能影响, 需要在实验站上安装 XFEL 脉冲筛选器-快速 X 射线快门. 该快门要具有短的打开和关闭时间, 以允许所选的 XFEL 单脉冲通过并与样品作用, 实现单脉冲成像. 实验站安装的脉冲筛选器为 uniblitz XRS 系列的 6 mm X 射线快门, 快门的最小打开/关闭循环时间小于 20 ms, 可以满足 50 Hz 的脉冲筛选要求, 这也是 SXFEL 的基本重复频率. 另外, 该快速 X 射线快门还可以在 Burst 模式下工作, 实现多脉冲序列输出. 在这种模式下, 只有定义数量的 XFEL 脉冲将被传输用于与样品相互作用.

XFEL 单脉冲实验的特点是需要在 XFEL 脉冲到达前确保样品台、探测器等仪器已准备就绪. 因此, 定时系统中的 BNC505 工作在外触发模式, 通过硬连接的方式获取 1—50 Hz, 预延迟 10 ms 的信号. 这样可以确保在 XFEL 脉冲到达前, 实验仪器已经完成了准备工作. 通过定时系统和快速 X 射线快门的配合实现 0—50 Hz 重复频率的单脉冲实验.

SXFEL 单脉冲成像的关键在于通过定时系统实现 X 射线脉冲的筛选、X 射线快门和探测器曝光及数据采集的同步. 实验过程如图 2 所示, X 射线探测器触发同步端接入 BNC505 输出信号, 通过探测器控制软件, 选择合适的工作模式和参数, 同时将探测器的触发输出信号接入快速 X 射线快门控制器中控制快门的打开/关闭时间, 实现 XFEL 脉冲选频, 只允许特定频率脉冲用于与样品相互作用. 图 3 所示为 XFEL 脉冲、快速 X 射线快门的开关时间、定时系统触发信号输入/输出等在时间轴上的相对位置和时序关系, 其中 $t_{\rm o}$ 和 $t_{\rm c}$ 分别为 X 射线快门的固有开关时间, $T_{\rm o}$ 和 $T_{\rm c}$ 分别为快门打开设定时间后探测器曝光和曝光后快门关闭时间.

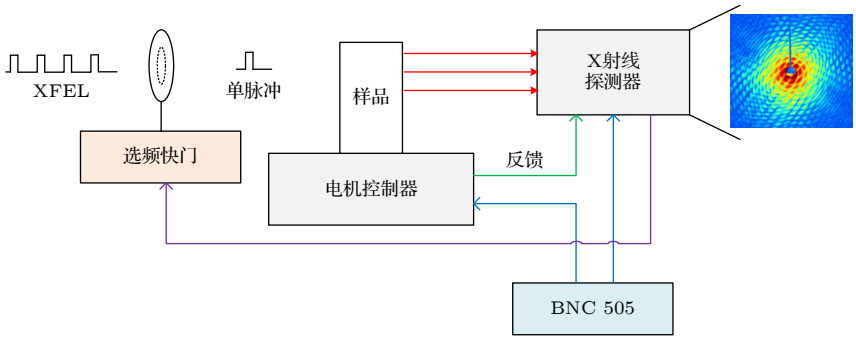

图 2 XFEL 单脉冲成像设备连接示意图: 特定时序关系的触发信号经 BNC505 分发给 X 射线探测器和电机控制器, 用于同步 XFEL 脉冲. X 射线探测器的触发输出信号用于控制 X 射线快门的开关时间

Fig. 2. XFEL single-shot imaging devices connection schematic: The trigger signal with specific timing relationships is distributed to the X-ray detector and the motor controller via the BNC505, used to synchronize the XFEL pulses. The trigger output signal from the X-ray detector is used to control the switching time of the X-ray shutter.

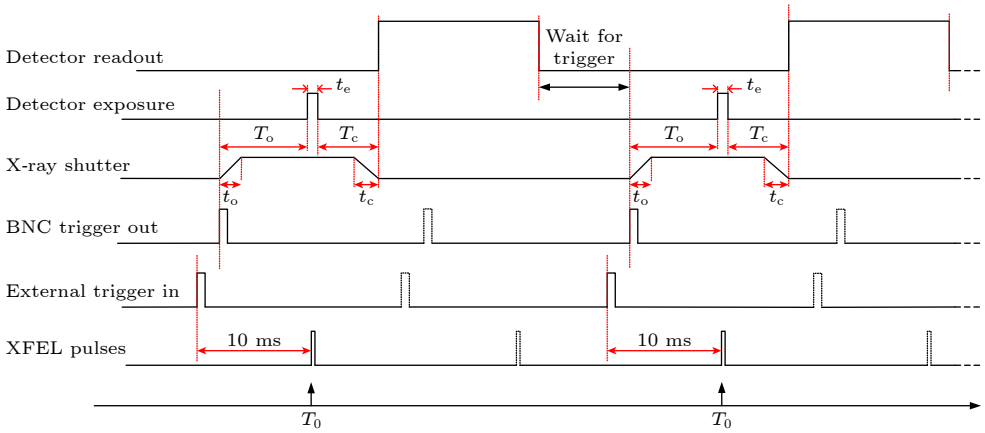

图 3 XFEL 单脉冲成像工作时序图: 外部触发输入和 BNC505 触发输出的时间延迟由快门的固有开关时间决定. 对 X 射线快门的操作, 保证只有一个 XFEL 脉冲与样品的交互发生在探测器曝光时间内, 避免多余脉冲损害样品和探测器

Fig. 3. XFEL single-shot imaging working sequence diagram: The time delay between the external trigger input and the BNC505 trigger output is determined by the inherent switching time of the shutter. The operation of the X-ray shutter ensures that only one XFEL pulse interacts with the sample during the detector's exposure time, preventing additional pulses from damaging the sample and the detector.

单脉冲实验中探测器实际工作需要一个外触发脉冲启动整个系列的数据采集工作, 包括探测器的曝光和数据读出. 外部触发输入和 BNC505 触发输出的时间延迟由快门的打开时间 ($t_{\rm o}$) 决定. 探测器接收到 BNC505 触发信号时, 快门打开设定时间后探测器曝光, 如实验中将 $T_{\rm o}$ 设置为 8 ms, 曝光时间结束快门延迟设置时间后关闭, 如将 $T_{\rm c}$ 设置为 5 ms. 设定快门曝光前打开与曝光后关闭时间要大于快门的固有开关时间, 确保单个 XFEL 脉冲与样品的交互发生在探测器曝光时间内, 并且保证有足够的时间收集单个 XFEL 脉冲与样品作用后的图像. 之后以正常速度读取数据, 一旦数据读出完成, 探测器就准备下一个触发系列的操作. 探测器从曝光到数据读出期间, 对快门的操作将使只有一个脉冲与样品相互作用并采集衍射图像. 图 3 中虚线为 XFEL 脉冲和触发信号, XFEL 脉冲由于快门的闭合不会影响单脉冲成像.

3 单脉冲成像定时的测试

基于该定时系统的单脉冲成像实验在 SXFEL 的 CSI 实验站开展. CSI 位于 SXFEL 的 SASE 光束线末端, 利用 SXFEL 涵盖全水窗波段的高亮度、全相干的飞秒 XFEL 脉冲, 研究生物材料、纳米材料等样品的超快、超微结构. 该实验站已经于 2023 年对用户开放运行.

SXFEL 单脉冲实验使用的大面板探测器位于样品下游 37 cm 处, 该探测器像素尺寸为 15 μm×

15 μm, 像素数为 4096 pixel×4096 pixel[15], 全帧最高工作频率为 0.56 Hz, 这决定了 SXFEL 单脉冲实验的工作频率, 因此在实验中 XFEL 的重频频率被设定为 1 Hz. 利用该定时系统, 通过控制 X 射线快门、X 射线探测器和扫描样品台的同步触发, 实现了样品的单脉冲照射和 X 射线探测器对单脉冲衍射图样的采集. 在实验中, 为了保护探测器免受高亮度 XFEL 脉冲的损伤, 在直通光照射探测器的位置放置了一个直径 1.5 mm 的直通光挡板. 在实验中, 使用波长为 2.4 nm、脉冲长度为 100 fs 的 X 射线自由电子激光脉冲照射样品.

CSI 实验站使用 Kirkpatrick-Baez (KB) 镜进行聚焦, 将 XFEL 光斑聚焦至 3 μm 左右[24]. 测试样品为六边金纳米盘, 边长约 300 nm, 厚度约 30 nm. 样品均匀的分散于 50 nm 膜厚的 Si_3N_4 窗口上. 针对 XFEL 单脉冲成像中同一样品只能照射一次, 需要样品实时更新的需求, 实验中通过同步移动固体靶扫描样品台对分散在 Si_3N_4 窗口上的样品逐点扫描, 确保每一个 XFEL 脉冲照射到的样品是全新的. 图 4(a) 为以步长为 50 μm, 利用 XFEL 脉冲扫描后的 Si_3N_4 窗口. 所示孔洞是 XFEL 单个脉冲照射样品后将 Si_3N_4 窗口连同样品一起离子化造成的. 孔洞的均匀分布符合设计的实验帧频, 表明整套定时系统顺利工作在设计的 1 Hz 频率.

图 4(b) 为六边金纳米盘的单脉冲衍射图样, 信号可以达到探测器边缘. 进一步采用 OSS (oversampling smoothness) 和 ER (error reduction) 相结合的相位恢复与图像重构算法对该单脉冲衍射图样进行了 1000 次独立重构, 每次重构包括 2800 次 OSS 迭代和 200 次 ER 迭代[26]. 选取误差最小的 100 组重构结果计算平均值, 得到如图 4(c) 所示的重构结果. 重构结果显示了完整的六边纳米盘结构, 证明了在该定时系统下, 成功实现了单脉冲成像. 进一步采用相位恢复传递函数 (phase retrieval transfer function, PRTF), 以 PRTF 大于 1/e 为标准[27,28], 计算了该重构结果的分辨率, 半周期分辨率约为 22.1 nm, 如图 4(d) 所示. 通过

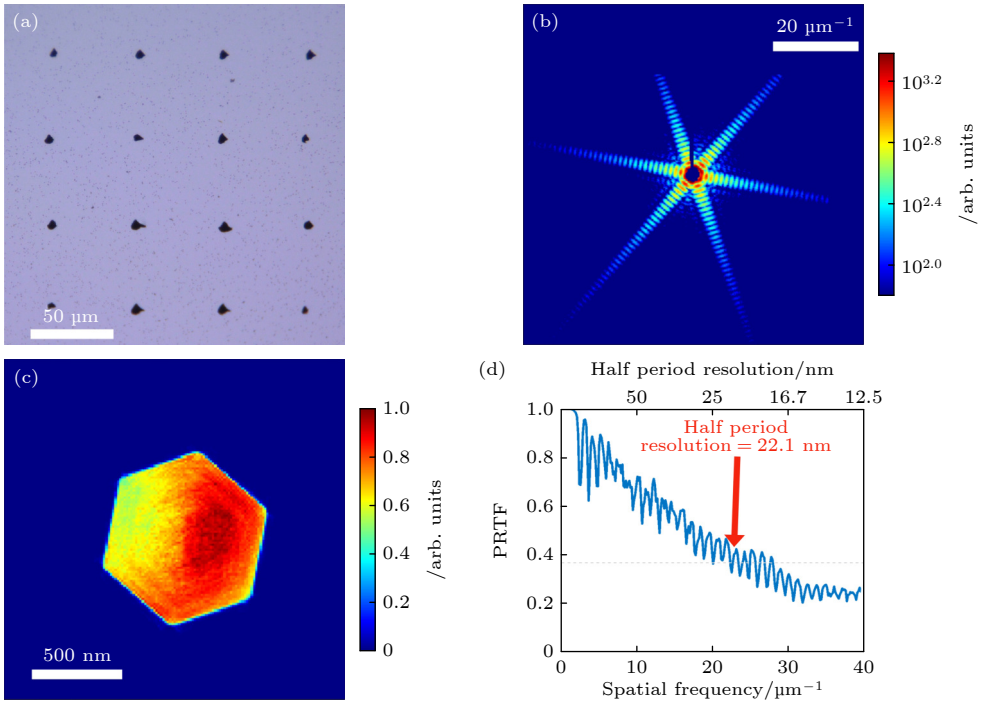

图 4 单脉冲相干衍射成像结果与分析 (a) XFEL 脉冲逐点扫描沉积有六边金纳米盘样品的 Si_3N_4 窗口, 其中孔洞是 XFEL 的高亮度、飞秒脉冲将 Si_3N_4 窗口与样品一同离子化的结果; (b) 六边金纳米盘的单脉冲衍射图样; (c) 1000 次独立重构, 选取误差最小的 100 组重构的平均结果; (d) 重构图像的 PRTF, 以灰色虚线所示的 1/e 为标准, 样品成像的半周期分辨率为 22.1 nm

Fig. 4. Results and analysis of single-shot coherent diffraction imaging. (a) A membrane with holes after the single-shot experiment. The hole is caused by ionization of gold nanoparticles Si_3N_4 window deposited by a single XFEL pulse hit. Scanning interval of 50 μm is used. (b) Single-shot diffraction pattern of a hexagonal gold nanodisks. (c) Reconstructed image from (b), from 1000 independent reconstructions, the 100 groups with the smallest error were chosen to calculate the average value. (d) The PRTF curve dropping below 1/e as the grey dashed line shows, the half-period resolution is 22.1 nm.

衍射图样和重构结果进一步验证了设计的定时系统能够实现 SXFEL 单脉冲成像.

4 结 论

本文详细介绍了 SXFEL 单脉冲成像定时的设计和实现过程. CSI 实验站采用 WR 和 DDG (BNC505) 的定时系统方案可实现 50 Hz 的单脉冲成像. 目前受探测器性能影响需要使用 X 射线选频快门控制和筛选特定频率的 XFEL 脉冲, 避免样品损坏或辐射损伤. 利用该定时系统在 SXFEL 的 CSI 实验站进行了 XFEL 单脉冲成像实验. 成像结果表明, 采用的定时系统方案能够精确地控制成像过程各设备的时间序列, 确保脉冲与样品交互在特定的时间点进行相应操作, 实现 SXFEL 单脉冲成像. WR 和 BNC505 设计的定时系统为 SXFEL 单脉冲成像实验提供了关键的技术支持, 确保实验的准确性、可靠性. 对于在 SXFEL 开展单脉冲实验具有重要的意义, 为基于 SXFEL 单脉冲实验开展前沿科学研究奠定了基础.

参考文献

[1] Fan J D, Jiang H D 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 218702 (in Chinese) [范家东, 江怀东 2012 物理学报 **61** 218702]

[2] Sakdinawat A, Attwood D 2010 *Nat. Photonics* **4** 840

[3] Zhou G Z, Tong Y J, Chen C, Ren Y Q, Wang Y D, Xiao T Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 028701 (in Chinese) [周光照, 佟亚军, 陈灿, 任玉琦, 王玉丹, 肖体乔 2011 物理学报 **60** 028701]

[4] Zhou G Z, Wang Y D, Ren Y Q, Chen C, Ye L L, Xiao T Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 018701 (in Chinese) [周光照, 王玉丹, 任玉琦, 陈灿, 叶琳琳, 肖体乔 2012 物理学报 **61** 018701]

[5] Thibault P, Dierolf M, Menzel A, Bunk O, David C, Pfeiffer F 2008 *Science* **321** 379

[6] Song C Y, Jiang H D, Mancuso A, Amirbekian B, Peng L, Sun R, Shah S S, Zhou Z H, Ishikawa T, Miao J W 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 158101

[7] Jiang H D, Song C Y, Chen C C, Xu R, Raines K S, Fahimian B P, Lu C H, Lee T K, Nakashima A, Urano J, Ishikawa T, Tamano F, Miao J W 2010 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **107** 11234

[8] Chapman H N, Barty A, Bogan M J, Boutet S, Frank M, Hau-Riege S P, Marchesini S, Woods B W, Bajt S, Benner W H, London R A, Plönjes E, Kuhlmann M, Treusch R, Düsterer S, Tschentscher T, Schneider J R, Spiller E, Möller T, Bostedt C, Hoener M, Shapiro D A, Hodgson K O, van der Spoel D, Burmeister F, Bergh M, Caleman C, Huldt G, Seibert M M, Maia F R N C, Lee R W, Szöke A, Timneanu N, Hajdu J 2006 *Nat. Phys.* **2** 839

[9] Neutze R, Wouts R, van der Spoel D, Weckert E, Hajdu J 2000 *Nature* **406** 752

[10] Ihm Y, Cho D H, Sung D, Nam D, Jung C, Sato T, Kim S, Park J, Kim S, Gallagher-Jones M, Kim Y, Xu R, Owada S, Shim J H, Tono K, Yabashi M, Ishikawa T, Miao J, Noh D Y, Song C 2019 *Nat. Commun.* **10** 2411

[11] Gaffney K J, Chapman H N 2007 *Science* **316** 1444

[12] Miao J, Ishikawa T, Robinson I K, Murnane M M 2015 *Science* **348** 530

[13] Hidvegi A, Gessler P, Rehlich K, Bohm C 2011 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **58** 1852

[14] Ye Y, Li H, Li J, Yan Y, Yu P, Gong G 2022 *J. Instrum.* **17** T09009

[15] Fan J D, Tong Y J, Nie Y G, Gao Z C, He B, Luan H, Lu D H, Zhang J H, Zhang D F, Yuan X Y, Chen J H, Guo Z, Liu T, Zhang M, Feng C, Deng H X, Liu B, Zhao Z T, Liu Z, Jiang H D 2022 *Nucl. Sci. Tech.* **33** 114

[16] MFR homepage, http://www.mrf.fi/ [2024-4-11]

[17] Kim C, Baek S Y, Kang H S, Kim J, Kim K W, Ko I S, Mun G, Park B R 2015 *Proceedings of the 15th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems* Melbourne, Australia, October 17–23, 2015 p79

[18] Kalantari B, Biffiger R 2017 *Proceedings of 16th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems* Barcelona, Spain, October 8–13, 2017 p232

[19] Krejcik P, Akre R A, Allison S, Browne M, Dalesio L R, Dusatko J E, Frisch J C, Fuller R, Gromme A E, Kotturi K D, Norum S, Rogind D, White W E, Zelazny M 2007 *Proceedings of the 8th European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators* Venice, Italy, May 20–23, 2007 p373

[20] WR homepage, https://white-rabbit.web.cern.ch/ [2024-4-11]

[21] Yu P G, Yan Y B 2023 *Nucl. Electron. Detect. Technol.* **43** 923 (in Chinese) [余鹏翔, 阎映炳 2023 核电子学与探测技术 **43** 923]

[22] Yan Y B, Chen G H, Gong G H, Gu J L, Jiang Z Y, Xiao Q W, Ye Y M, Yu P X, Zhao L 2022 *Proceedings of the 13th International Particle Accelerator Conference* Bangkok, Thailand, June 12-17, 2022 p2415

[23] Yu C L, Zhao H, Hu S M, Ding J G 2019 *Nucl. Tech.* **42** 040102 (in Chinese) [于春蕾, 赵欢, 胡守明, 丁建国 2019 核技术 **42** 040102]

[24] Tong Y J, Fan J D, Nie Y G, Guo Z, Gao Z C, Yuan X Y, He B, Chen J H, Zhang D F, Luan H, Zhang J H, Lu D H, Xie M H, Cheng P, Feng C, Liu T, Deng H X, Liu B, Liu Z, Jiang H D 2022 *Front. Phys.* **10** 977957

[25] Park J, Eom I, Kang T H, Rah S, Nam K H, Park J, Kim S, Kwon S, Park S H, Kim K S, Hyun H, Kim S N, Lee E H, Shin H, Kim S, Kim M J, Shin H J, Ahn D, Lim J, Yu C J, Song C, Kim H, Noh D Y, Kang H S, Kim B, Kim K W, Ko I S, Cho M H, Kim S 2016 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **810** 74

[26] Rodriguez J A, Xu R, Chen C C, Zou Y, Miao J 2013 *J. Appl. Crystallogr.* **46** 312

[27] Shapiro D, Thibault P, Beetz T, Elser V, Howells M, Jacobsen C, Kirz J, Lima E, Miao H, Neiman A M, Sayre D 2005 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **102** 15343

[28] Chapman H N, Barty A, Marchesini S, Noy A, Hau-Riege S P, Cui C, Howells M R, Rosen R, He H, Spence J C H, Weierstall U, Beetz T, Jacobsen C, Shapiro D 2006 *J. Opt. Soc. Am. A* **23** 1179

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

Nie Yong-Gan [1)2)] Gao Zi-Chen [2)] Tong Ya-Jun [2)] Fan Jia-Dong [2)†]

Liu Gong-Fa [1)] Jiang Huai-Dong [2)‡]

1) (*National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei* 230029, *China*)

2) (*Center for Transformative Science, ShanghaiTech University, Shanghai* 201210, *China*)

(Received 18 March 2024; revised manuscript received 22 April 2024)

Abstract

X-ray free-electron laser (XFEL), as a novel advanced X-ray light source, has excellent properties such as ultra-high brightness, ultra-shot pulse duration, and full coherence. The coherent X-ray diffraction imaging (CDI) has a lot of advantages at high resolution and quantitative imaging compared with the traditional lens based X-ray imaging methods. By combining the excellent properties of XFEL and advantages of CDI, the single-shot imaging has been realized, based on the concept of "diffraction before destruction". Shanghai soft X-ray free-electron laser facility (SXFEL) is the first XFEL facility operated at the X-ray wavelength in China. The coherent scattering and imaging (CSI) endstation is the first commissioned endstation at SXFEL, focusing on the high spatiotemporal imaging for nano materials and micro materials by using a single-shot imaging method. To realize the single-shot experiment at XFEL, especially for single-shot imaging, the timing system plays a crucial role in ensuring the operation of the equipment in sequence. This paper introduces the design and implementation process of SXFEL single-shot imaging timing. The timing system is implemented with White Rabbit (WR) and digital delay and pulse generator (BNC505). Single-shot imaging is realized by synchronously moving the sample scanning stages and X-ray shutter to select a single pulse to illuminate the sample. At the same time, the X-ray detector is triggered with the timing system to record the single-shot diffraction pattern. During debugging, a gold nanodisks each with a side length of approximately 300 nm and a thickness of about 30 nm, as test samples, are imaged at the CSI endstation. The nanodisks are uniformly dispersed on Si_3N_4 membranes for single-shot imaging. Because of the ultra-high peak intensity at the focus spot, the samples and membrane are ionized for each XFEL pulse shot. A raster scan is performed on the membranes at intervals of 50 μm to update the sample. With the timing system and X-ray shutter, single-shot diffraction patterns can be recorded by using an X-ray detector. From the image of the Si_3N_4 membrane after raster scanning, the ionized holes with an interval of 50 μm can be recognized. Finally, phase retrieval is applied to the single-shot diffraction pattern to obtain a real-space image of the sample. The resolution of the reconstructed image is estimated by calculating the phase-retrieval transfer function (PRTF). With a citation of the PRTF curve dropping below $1/\mathrm{e}$, the spatial frequency cutoff is determined to be 22.6 μm^{-1}, corresponding to a half period resolution of 22.1 nm. The results show that the designed timing system can accurately control the time sequence of the imaging process, meeting the requirement for single-shot imaging within 50 Hz at SXFEL.

Keywords: coherent X-ray diffraction imaging, X-ray free electron laser, single shot imaging, timing system

PACS: 07.05.Fb, 07.05.Dz, 29.85.Fj **DOI:** 10.7498/aps.73.20240383

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2022YFA1603703), the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDB37040303), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12335020).

† Corresponding author. E-mail: fanjd@shanghaitech.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: jianghd@shanghaitech.edu.cn

物理学报 Acta Physica Sinica
Chinese Physical Society
Institute of Physics, CAS

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

聂勇敢 高梓宸 佟亚军 范家东 刘功发 江怀东

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

Nie Yong-Gan Gao Zi-Chen Tong Ya-Jun Fan Jia-Dong Liu Gong-Fa Jiang Huai-Dong

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 73, 120701 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240383
在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.73.20240383
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

上海光源硬X射线相干衍射成像实验方法初探
Preliminary exploration of hard X-ray coherent diffraction imaging method at SSRF
物理学报. 2020, 69(3): 034102 https://doi.org/10.7498/aps.69.20191586

高重频硬X射线自由电子激光脉冲到达时间诊断方法研究
Arrival time diagnosis method of high refrequency hard X-ray free electron laser
物理学报. 2023, 72(10): 105203 https://doi.org/10.7498/aps.72.20222424

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Z箍缩实验的软X射线成像系统
Soft x-ray imaging system used for Z-pinch experiments
物理学报. 2021, 70(4): 045203 https://doi.org/10.7498/aps.70.20200957

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

基于迭代重构算法改进晶体衍射分光X射线鬼成像的图像质量研究
Improving quality of crystal diffraction based X-ray ghost imaging through iterative reconstruction algorithm
物理学报. 2022, 71(7): 074201 https://doi.org/10.7498/aps.71.20211978