

激光与光电子学进展

硬 X 射线自由电子激光分束延迟光学系统

吴宸^{1,2}, 张志远², 徐以会³, 宋丽⁴, 董晓浩^{2,4*}, 刘志^{1,3}¹上海科技大学物质科学与技术学院, 上海 201210;²中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800;³上海科技大学大科学中心, 上海 201210;⁴中国科学院上海高等研究院, 上海 201210

摘要 为解决硬 X 射线自由电子激光装置难以提供皮秒至纳秒区间时间分辨的问题, 提出了面向目前正在建的上海硬 X 射线自由电子激光装置分束延迟的系统设计。采用基于晶体衍射的延迟方法设计分束延迟光学系统, 计算了延迟时间范围, 模拟了系统光通量, 搭建了一台样机并进行了光路对准实验。该设计采用空间分光方式, 将入射脉冲分为两个部分, 并通过路程差在二者之间引入时间延迟, 具体的原理样机设计适用于光子能量在 7~11 keV 范围, 最多能实现 -15.4~503.3 ps 的时间延迟。使用 Shadow 模拟了样机设计的光通量, 两个分支光通量分别为 33.54% 和 33.64%, 符合 1:1 的设计目标。使用绿光激光进行了样机的光路对准实验, 证明该样机能使空间分光后的两束光重新复合, 为后续 X 射线验证实验提供基础。该设计具有空间尺寸小、延迟范围大、入射能量和延迟时间连续可调的优点, 为上海硬 X 射线自由电子激光装置的分束延迟系统研制提供参考。

关键词 光学设计与制造; 分束器; X 射线光学; 自由电子激光; 超快光学; 时间延迟

中图分类号 O439 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220917

Split-Delay Optical System for Hard X-Ray Free-Electron Lasers

Wu Chen^{1,2}, Zhang Zhiyuan², Xu Yihui³, Song Li⁴, Dong Xiaohao^{2,4*}, Liu Zhi^{1,3}¹School of Physical Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China;²Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;³Center for Transformative Science, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China;⁴Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China

Abstract Time resolution in the picosecond to nanosecond range is difficult to achieve for a hard X-ray free-electron laser device. To solve this problem, a split-delay optical system design for a hard X-ray free-electron laser device currently under construction in Shanghai is proposed. The design is based on crystal diffraction, the delay time range is calculated, the system throughput is simulated, and a prototype is built and verified. The design can split a single X-ray pulse into two fractions using the spatial division method, and a time delay is introduced between the fractions by using different path lengths. The prototype can operate over a wide and continuous energy range between 7 and 11 keV and provide a delay from -15.4 to 503.3 ps. Throughputs of 33.54% (upper) and 33.64% (lower) for the split-delay optical system were simulated by Shadow, meeting the objective of a 1:1 ratio. An alignment experiment for the prototype was conducted with a green laser, and the results demonstrate that the prototype can recombine the two beams after spatial division, laying the groundwork for future X-ray verification experiments. The design has the advantages of a small size, wide delay range, and continuously adjustable incident energy and delay time, which can facilitate the development of a split-delay optical system for the Shanghai hard X-ray free-electron laser device.

Key words optical design and fabrication; beam splitters; X-ray optics; free-electron lasers; ultrafast optics; time delay

1 引言

X 射线泵浦探测 (XPP) 和 X 射线光子关联光谱

(XPCS) 等超快动力学实验的时间分辨率受限于入射脉冲宽度。X 射线自由电子激光可以提供飞秒级脉冲宽度的 X 光^[1], 这扩展了超快动力学实验在 X 射线波

收稿日期: 2022-02-07; 修回日期: 2022-03-14; 录用日期: 2022-03-24; 网络首发日期: 2022-04-05

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U1832172)、上海市市级科技重大专项(2017SHZDZX02)

通信作者: *dongxiaohao@zjlab.org.cn

段的最小时间分辨尺度。超快动力学实验的时间分辨范围取决于入射脉冲的时间间隔。通过不同的运行模式, X射线自由电子激光装置的脉冲能提供 0~1 ps^[2-4]和数个纳秒^[5]的延迟,但在皮秒至纳秒区间尚存在空缺,这需要使用分束延迟技术填补^[6-8]。分束延迟光学系统是一种通过路程差来实现光束延迟的光学系统,先通过分束器将入射光分为两束,再通过不同长度的光路使两束光之间产生延迟。这种光学系统已在 XPP、XPCS 等实验中得到应用^[9-11]。

由于 X 射线在物质上的全反射角临界角极小,许多使用全反射原理调控延迟的方法^[12-13]不再有效。目前在分束延迟光学系统中常用到多层膜反射镜、光栅和晶体这 3 类基于 X 射线衍射的光学元件。基于多层膜反射镜和光栅的分束延迟光学系统在极紫外到软 X 射线波段有过成功的应用^[14-16]。但在硬 X 射线波段,由于光子波长变短,元件反射(衍射)角度仅为数十毫弧度,难以在数米的空间内覆盖所需的延迟时间空缺,但这也同时使它们的时间分辨能力更强,能达到亚飞秒量级^[17]。利用晶体衍射可以在硬 X 射线波段实现更大的反射角度,这使得分束延迟光学系统的延迟能力大大增强,并有机会填补这个时间空缺。

过去的十几年里,多款基于晶体衍射的硬 X 射线分束延迟光学系统被报道。第一款基于晶体的分束延迟光学系统由 Roseker 等^[6]在 2009 年研制,在 LCLS 装置的 XCS 仪器上成功安装并调试。该设计利用 8 块晶体近 45° 的布拉格衍射,实现了超过 1 ns 的最大延迟时间,成功覆盖了前述时间范围,但由于角度的限制,该设备的入射光子能量几乎无法通过除更换晶体以外的手段调节。2014 年,Osaka 等^[18]提出了一种新的设计方案,允许晶体具有较大的角度调节范围,扩大了系统的适用能量范围。这种设计中使用引入切槽晶体替代部分平面晶体,降低系统光路对准难度。在此基础上, Lu 等^[19]和 Zhu 等^[8]也设计并安装了分束延迟光学系

统。Rysov 等^[20]提出了一种紧凑型设计方案,将整套系统集成在 60 cm×60 cm×30 cm 的空间内,方便安装、拆卸与运输。本文课题组也正在为上海硬 X 射线自由电子激光装置(SHINE)设计一款混合型分束延迟光学系统^[21]。

本文采用了一种基于晶体衍射的延迟方法,设计了分束延迟光学系统,计算了系统延迟时间范围并模拟了光通量,搭建了一台样机并进行了光路对准实验。该系统的入射光子能量范围在 7~11 keV,计算得到的延迟时间范围为 -15.4~503 ps。通过 Shadow 光学软件模拟了该系统的光路,得到系统两个分支的光通量分别为 33.54% 和 33.64%。使用可见光激光对样机进行了对准实验。相关工作经验将为 SHINE 项目的分束延迟光学系统研制提供帮助。

2 系统设计

2.1 设计原理

分束延迟光学系统是一种通过路程差来实现延迟的光学系统,先通过分束器将入射光分为两束,再通过不同的光路使两束光之间产生路程差。分束延迟系统的延迟时间可以表示为

$$\tau = \frac{\Delta s}{c}, \quad (1)$$

式中: τ 为系统延迟时间; Δs 为两束光之间的几何路程差值; c 为光速。图 1 是目前常见硬 X 射线分束延迟系统的原理示意图。目前常见的分束延迟系统会将光分为固定延迟束和可变延迟束,其中固定延迟束拥有固定的路程长度,而可变延迟束的路程长度可以调整。调节系统延迟时间主要依靠可变延迟束,固定延迟束作为零延迟参考点使用。因此,想要获得较大的延迟时间范围就需要可变延迟束的最大路程尽可能大,而固定延迟束的路程尽可能小。但为使系统能够实现零延迟点,固定延迟束也需要有一定的延迟能力。

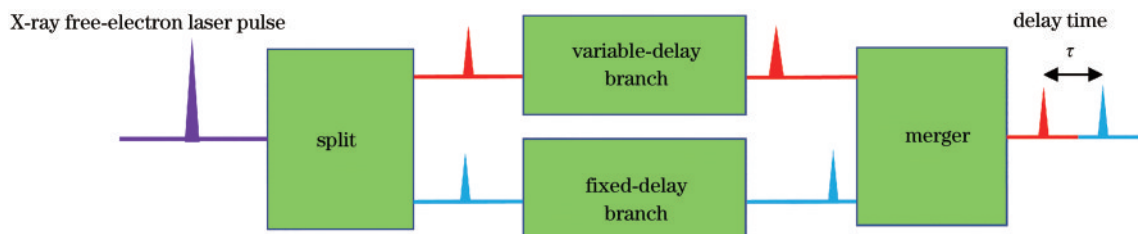


图 1 分束延迟光学系统原理

Fig. 1 Schematic of split-delay optical system

目前,硬 X 射线分束延迟系统使用的光学元件主要有 3 类:多层膜反射镜、光栅和晶体。在硬 X 射线波段,多层膜反射镜和光栅反射角度较小,难以在较短的空间内实现数百皮秒的延迟。利用晶体可以轻易实现十几度到几十度的反射角度,这使得系统的延迟能力大大增加。

分束的原理是使光束中一部分束的传播方向发生改变,使光束向 2 个或多个不同方向传播。常见的分束方法主要有波前分束和强度分束两种。如图 2(a)所示,波前分束通过分割入射光的波前实现分束,多层膜反射镜分束器^[22-23]和布拉格衍射厚晶体分束器^[8,19,24]即通过这种方式分束。强度分束通过分束元件较薄的

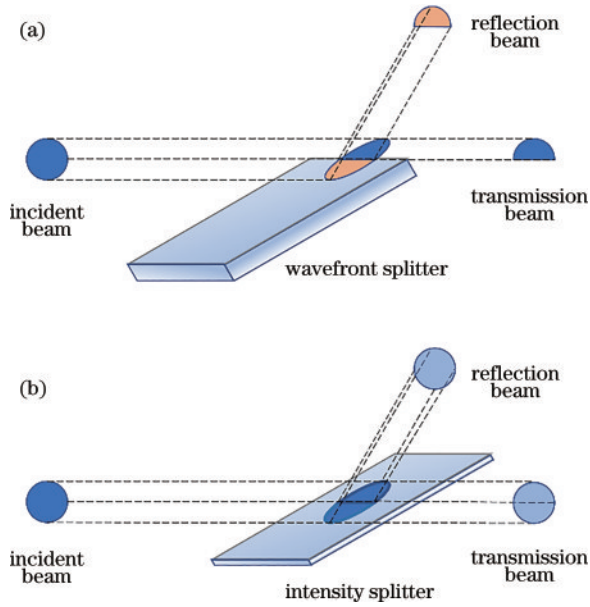


图 2 分束示意图。(a)波前分束;(b)布拉格型衍射晶体强度分束
Fig. 2 Schematic of splitting. (a) Wavefront splitting;
(b) intensity splitting based on Bragg crystals

工作区导致的不完全反射实现分束。强度分束有多种形式,可以通过透射式光栅的不同衍射级次实现分束^[14-15,25],也可以通过薄晶体的不完全衍射同时产生反

射束和透射束实现分束^[6,19,26-27]。分束器使用的薄晶体既可以是劳厄型的^[6,26]也可以是布拉格型的^[18-19],图 2(b)为常见的布拉格型衍射晶体强度分束示意图。

理想情况下,合束是分束的逆过程,一般同套分束延迟光学系统的合束元件与分束元件相同。合束要求两束光的光斑能在样品处重叠。在实际使用过程中,仅通过调节系统内各元件将两束光完全合并在同一光路上存在困难,一般会将两束光调整至平行或接近平行的状态,然后通过略微偏转合束器^[16,28]或在下游加装反射镜^[19]使两束光在样品处交汇。

2.2 晶体光学系统布局

本文分束延迟光学系统基于晶体衍射光学,图 3 为其晶体布局示意图。一束自由电子激光脉冲入射分束延迟光学系统后,先被分束器(BS)分为两个部分。一部分光在 BS 处未发生衍射,沿原方向继续传播,进入由两块切槽晶体(CC)组成的下分支。一部分光在 BS 处发生衍射,改变方向后进入由两块平面晶体(BR)组成的上分支。两块平面晶体具有较大的线性位移范围,负责调控系统的延迟时间。上分支光束在合束器(BM)处发生衍射改变传播方向,然后与下分支出射光束平行传播。该系统设计在一个 50 cm×50 cm 的平面内,可以安装在实验站中使用。

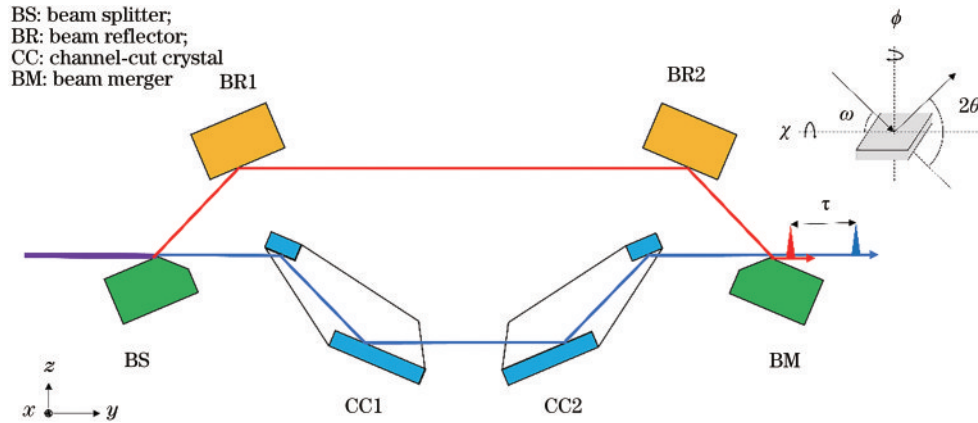


图 3 分束延迟光学系统晶体布局示意图
Fig. 3 Schematic of crystal layout of split-delay optical system

采用此种布局时,系统的延迟时间可以表示为

$$\tau = \frac{s_{\text{up}} - s_{\text{low}}}{c}, \quad (2)$$

式中, s_{up} 和 s_{low} 分别为光束在上分支和下分支的运动路程。系统的延迟主要由上分支的平面反射晶体与分束器/合束器之间的距离以及下分支的切槽晶体提供。可以通过改变平面反射晶体的位置来调整系统的延迟时间。下分支切槽晶体用于增加下分支光束运动路程,使系统延迟能达到零延迟点(即两束光同时到达样品),也可以将其移出光路来增加系统延迟时间。系统的延迟时间可以进一步表示为

$$\tau = \frac{2D(1 - \cos 2\theta_{\text{B}}^{\text{up}})}{c} - \frac{2D_0(1 - \cos 2\theta_{\text{B}}^{\text{low}})}{c}, \quad (3)$$

式中: $\theta_{\text{B}}^{\text{up}}$ 和 $\theta_{\text{B}}^{\text{low}}$ 分别为光束在上、下分支发生衍射时的布拉格角; D 为光束在分束器 BS 和平面晶体 BR 之间运动的距离; $D_0 = \frac{g}{\cos 2\theta_{\text{B}}^{\text{low}}}$ 为光束在切槽晶体 CC 内运动的距离; g 为切槽晶体槽宽。

当下分支无切槽晶体时,系统的延迟时间可以表示为

$$\tau = \frac{2D(1 - \cos 2\theta_{\text{B}}^{\text{up}})}{c}. \quad (4)$$

该设计的人射光子能量为 7~11 keV,使用 Si(220) 晶体作为衍射元件,相应的衍射角度约为 16.94°~27.25°,在该能量范围内,Si(220)完美晶体峰值反射

率能达到 98%~99%。为获得更大的延迟时间范围, D 的变化范围要在避免运动碰撞的前提下尽可能大, 本方案中取 60~180 mm。

2.3 晶体光学元件设计

本设计方案使用晶体衍射对光束进行分束和反射, 所有的晶体均为 Si(220), 衍射方式均为布拉格衍射。

本设计中分束方案选择工作性能更为稳定的波前分束。波前分束仅需将打磨光滑的晶体边缘插入光束即可实现, 光束的一部分打在晶体上发生衍射, 另一部分未打在晶体上直接透过。合束器的结构与分束器对称。

下分支使用一对镜像对称的切槽晶体, 可以增加下分支路程, 同时减小系统对准难度。切槽晶体的切槽宽度需要考虑: 1) 切槽晶体提供的延迟时间尽量小, 使系统的最大延迟时间尽量大; 2) 切槽晶体提供的延迟时间应大于系统上分支能提供的最小延迟时间, 使系统能实现零延迟; 3) 切槽晶体移出光路前后系统的延迟时间范围应保持连续, 即系统下分支有切

槽晶体时的最大延迟时间应大于系统下分支无切槽晶体时的最小延迟时间。最终, 切槽宽度 g 确定为 3 cm。设计时截去了切槽晶体的两个角, 这样可以减少晶体在转动中发生碰撞的可能, 也可以使晶体排布更紧凑。

为保证晶体能发生完全的布拉格衍射, 减少透射束的产生, 系统中使用的晶体均为厚晶体。其中, 切槽晶体反射面的厚度为 1 cm, 斜切晶体和平面晶体的厚度为 3 cm。

3 性能计算和模拟

3.1 延迟时间计算

依据式(3)和式(4), 本设计方案预计能达到的延迟时间如表 1 所示, 在 7 keV 时系统最大延迟时间能达到 500 ps, 11 keV 时系统最大延迟时间能达到 170 ps。在 7~11 keV 时系统最小延迟时间均低于 0, 且系统下分支有切槽晶体时的最大延迟时间均高于无切槽晶体时的最小时间, 这说明系统在设计能量范围内延迟时间连续可调, 切槽晶体的槽宽设计合理。

表 1 不同情况下系统延迟时间计算结果

Table 1 Calculation results of split-delay optical system at different situations

Photon energy E /keV	With channel-cut		Without channel-cut	
	Minimum delay τ_{\min} /ps	Maximum delay τ_{\max} /ps	Minimum delay τ_{\min} /ps	Maximum delay τ_{\max} /ps
7	-15.4	320.1	167.8	503.3
8	-31.8	225.1	128.4	385.3
9	-41.0	162.0	101.5	304.5
10	-46.0	118.4	82.2	246.6
11	-15.4	320.1	167.8	503.3

3.2 光通量模拟

假设入射光能量带宽大于晶体能量带宽, 上分支光束经过 4 次布拉格衍射, 其通量可近似表示为

$$T^{\text{up}} = \frac{1}{2} \frac{\Delta E_{\text{BM}}}{\Delta E_{\text{S}}} R_{\text{BS}} R_{\text{BR1}} R_{\text{BR2}} R_{\text{BM}}, \quad (5)$$

式中: T^{up} 为上分支光束的通量; ΔE_{S} 和 ΔE_{BM} 分别为入射光和合束器的能量带宽; R_{BS} 、 R_{BR1} 、 R_{BR2} 和 R_{BM} 分别为分束器、平面晶体 1、平面晶体 2 和合束器的布拉格反射率。类似地, 下分支光束通量可以表示为

$$T^{\text{low}} = \frac{1}{2} \frac{\Delta E_{\text{CC}}}{\Delta E_{\text{S}}} R_{\text{CC1}} R_{\text{CC2}}, \quad (6)$$

式中: T^{low} 为下分支光束的通量; ΔE_{CC} 为切槽晶体的能量带宽; R_{CC1} 和 R_{CC2} 分别为切槽晶体 1 和切槽晶体 2 的反射率。由于光束在上下分支均经过 4 次相同的布拉格衍射, 上两式可简化为

$$T^{\text{up}} = T^{\text{low}} = \frac{1}{2} \frac{\Delta E_{\text{Si}(220)}}{\Delta E_{\text{S}}} R_{\text{Si}(220)}^4, \quad (7)$$

式中, $\Delta E_{\text{Si}(220)}$ 和 $R_{\text{Si}(220)}$ 分别为单晶 Si(220) 面的能量分辨率和反射率。由式(7)可知, 当下分支存在切槽晶体时, 上下分支光通量之比约为 1:1。当下分支中

没有引入切槽晶体时, 下分支束不发生衍射, 此时其光通量为 50%。式(5)~(7)都假设入射光能量带宽大于晶体的能量带宽, 且使用反射率曲线峰值代表整体的反射率, 这种计算方式得到的结果在定量上不够准确, 但计算方便快捷, 可用于估计上下分支光通量比值。

为了得到更准确的系统光通量数据, 使用 Shadow 模拟系统光路。光源设置为一束准直的高斯光, 初始尺寸 $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$, 发散度 $0.1 \mu\text{m} \times 0.1 \mu\text{m}$, 能量为 8 keV, 采用 Si(111) 双晶单色器 (double crystal monochromator, DCM) 对入射光进行单色化。图 4 为光束经过分束延迟光学系统前后的光斑轮廓模拟。使用 Si(111) 晶体作为单色器模拟系统在单色光下的光通量, 光通量定义为上、下分支出射束强度 $I_{\text{upper}\backslash\text{lower}}$ 除以入射系统的光强 I_0 。表 2 为入射光子能量在 8 keV 时系统光通量模拟结果。当系统下分支存在切槽晶体时, 光束在上下分支各经过 4 次 Si(220) 布拉格衍射, 模拟得到它们的光通量分别为 33.54% 和 33.64%, 这个结果与 Rysov 等^[20]的紧凑型分束延迟光学系统计算结果相当[入射光为 Si(111) 单色光时, 上下分支总光

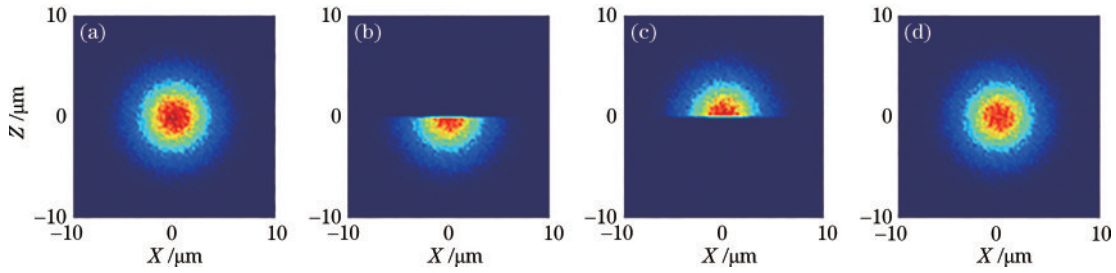


图 4 光斑轮廓模拟。(a)经过双晶单色器后的光斑;(b)上分支光斑;(c)下分支光斑;(d)合并光斑
Fig. 4 Simulation of beam profile. (a) Beam after DCM; (b) upper beam; (c) lower beam; (d) merged beam

表 2 8 keV 时光通量模拟结果
Table 2 Simulation results of throughput with 8 keV

Source $\Delta E/E$	Crystal configuration			Throughput of upper beam $T_{up} / \%$	Throughput of lower beam $T_{low} / \%$
	BS/BM	BR	CC		
$Si(111) 1.4 \times 10^{-4}$	Si (220)	Si (220)	—	33.54	50.00
	Si (220)	Si (220)	Si (220)	33.54	33.64

通量约为 66.3%], 略高于 Osaka 等^[18]的计算结果(上分支约为 30%, 下分支约为 20%)。上下分支光通量之比约为 1:1, 符合预期。当系统下分支没有引入切槽晶体时, 光束在下分支未发生衍射, 其光通量为 50%。

4 光路对准实验

4.1 实验设置

该设计实施的关键在于晶体元件质量和光路对准。本课题组委托中国科学院高能物理研究所按照晶体设计方案加工了一批硅晶体, 并进行了双晶摇摆曲线测试, 测试结果显示所有晶体的双晶摇摆曲线半峰全宽均在理论值的 $\pm 15\%$ 以内, 可以认为晶体能满足 X 射线衍射的使用需求。为进一步验证方案的可行性, 给系统的 X 射线对准步骤提供参考, 进行了系统的可见光对准实验。

使用定制的硅晶体组装了一台样机, 按照入射光为 8 keV 排布晶体位置。每块硅晶体均使用 Thorlabs 的 KPRMTE/M 电动精密旋转台调整晶体方位角 ω , 旋转台使用配套的控制器和软件操纵, 使用 Thorlabs 的 PM5/M 不锈钢可调压臂将晶体固定在旋转台上, 旋转台下方装有固定底座, 通过调节底座高度来调节晶体相对高度。样机的铝制面包板尺寸为 50 cm \times 50 cm。光源为可见光激光器。

分束延迟光学系统的对准目标是使经过空间分光的上下分支光斑在样品处复合。由于控制下分支光斑位置的晶体仅有两块, 可调节性相对上分支较小, 因此光路对准时先对准下分支光路, 再对准并调整上分支。根据前述分析, 确定分束延迟光学系统对准步骤为: 1) 调整下分支两块切槽晶体的位置和角度, 使下分支透光; 2) 调整分束器的位置和角度, 使分束器顺利分束; 3) 粗调上分支两块平面晶体和合束器的位置和角度, 使上分支透光; 4) 精调上分支光路, 使上分支光斑

与下分支光斑重叠。

4.2 结果与讨论

图 5 为下分支对准及分束后的实验图, 下分支光束在经过两块切槽晶体后成功打在白板上, 上分支平面晶体 1 水平放置, 将分束器处反射来的光反射到白板边缘和切槽晶体 2 压臂处。图 6 为上下分支均对准

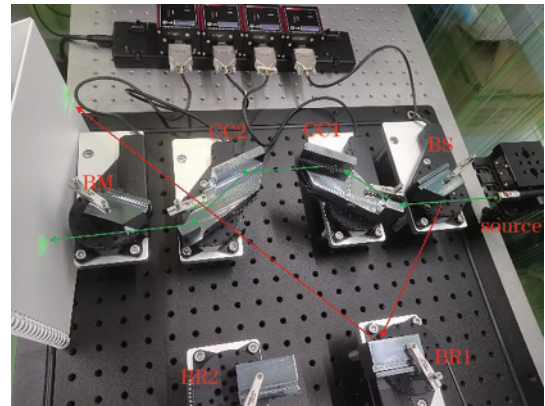


图 5 分束和下分支对准
Fig. 5 Splitting and alignment of lower-branch

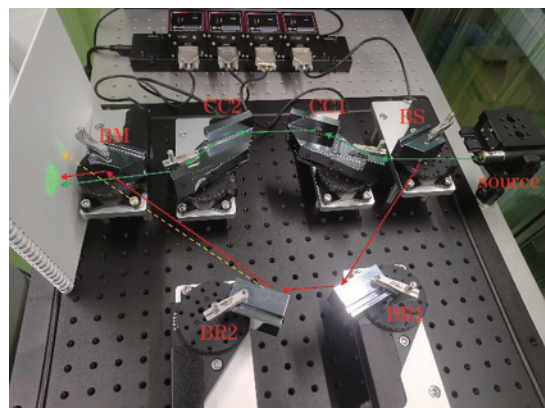


图 6 上分支对准
Fig. 6 Alignment of upper-branch

后的实验图,白板上出现了两处新的光斑,其中与下分支光斑相邻的是经合束器反射后的上分支光束,与这两处分隔较远的是上分支束打在合束器上产生的漏光(如图 6 中虚线所示)。

由以上结果可知,该光路可将空间分光后的两束光斑在出射后复合,实现对准,设计可行。由于可见光反射原理与硬 X 射线在晶体上的衍射原理不同,可见光在绝大部分角度入射晶体表面均可以发生反射,而晶体衍射对单色 X 射线的接收角仅为数十毫弧度,因此使用可见光模拟光路对准传播过程中光束的发散和光斑的扩大会非常明显,且使用可见光对准对入射角度控制的要求远低于硬 X 射线。由于晶体排布方式的原因,上分支两块平面晶体形成了一组色散型双晶结构,下分支两块切槽晶体的长晶面之间也形成了一组色散型双晶结构。因此上下分支在白板上光斑均有所扩大。由于入射角度的原因,上分支光束在合束器上的投影大于合束器反射区域,这导致上分支光斑为矩形而不是像下分支光斑那样近似为半圆形。尽管使用可见光对准时光斑发散较大,但在本系统内 X 射线衍射同样满足入射角等于出射角的条件,因此可见光光路和 X 射线光路的光路中心一致。由于系统内晶体数量多,除了要保证基本的光路畅通和出射束强度外,还需要能够调整上下光斑相对位置以及系统延迟时间,使用 X 射线时,系统的光路对准要求较高。但 Osaka 等^[18]曾专门讨论过该类设计的对准方案并在 Spring-8 中验证过其可行性^[24],得到的光通量符合理论预期。德国 DESY 也报道过一款小型化的设计方案^[20]。因此,可认为该系统的对准虽然复杂但是可行的。后续还将展开 X 射线验证实验。

5 结 论

针对 X 射线自由电子激光难以提供皮秒至纳秒区间时间分辨的问题,本文采用了一种基于晶体衍射的延迟方法,设计了一种具有空间尺寸小、延迟范围达数百皮秒、入射能量和延迟时间连续可调等优点的分束延迟光学系统,对设计进行了性能模拟,搭建了一台样机并进行了光路设计验证实验。该系统能在光子能量为 7~11 keV 的情况下使用,延迟时间最大范围为 -15.4~503.3 ps。使用 Shadow 模拟入射光能量为 8 keV、能量带宽为 1.4×10^{-4} 时系统上、下分支的光通量,结果分别为 33.54% 和 33.64%,与国际同类设计相当。

使用可见光激光进行了光路对准实验,能够将两束光斑的轮廓合并在一起,达到对准实验预期目标。后期进行 X 射线对准实验时可以在设计的分束延迟系统基础上加装聚焦元件或反射镜辅助对准,从而使空间分光后的光斑互相重叠。目前实验室条件不能满足实验需求,后续将在上海光源相关线站进一步展开。相关工作经验可以为 SHINE 项目光束站的分束延迟

装置设计提供帮助。

参 考 文 献

- [1] 赵振堂,王东,殷立新,等. X 射线自由电子激光试验装置[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0114006.
Zhao Z T, Wang D, Yin L X, et al. Shanghai soft X-ray free-electron laser test facility[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0114006.
- [2] Hara T, Inubushi Y, Katayama T, et al. Two-colour hard X-ray free-electron laser with wide tunability[J]. Nature Communications, 2013, 4: 2919.
- [3] Marinelli A, Ratner D, Lutman A A, et al. High-intensity double-pulse X-ray free-electron laser[J]. Nature Communications, 2015, 6: 6369.
- [4] Inoue I, Inubushi Y, Sato T, et al. Observation of femtosecond X-ray interactions with matter using an X-ray-X-ray pump-probe scheme[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113(6): 1492-1497.
- [5] Decker F J, Akre R, Brachmann A, et al. A demonstration of multi-bunch operation in the LCLS[C]// Proceedings of the 32nd International Free-Electron Laser Conference, August 23-27, 2010, Malmo City, Sweden. Geneva: JACoW, 2010: 467-470.
- [6] Roseker W, Franz H, Schulte-Schrepping H, et al. Performance of a picosecond X-ray delay line unit at 8.39 keV[J]. Optics Letters, 2009, 34(12): 1768-1770.
- [7] Lu W, Noll T, Roth T, et al. Design and throughput simulations of a hard X-ray split and delay line for the MID station at the European XFEL[J]. AIP Conference Proceedings, 2016, 1741(1): 030010.
- [8] Zhu D L, Sun Y W, Schafer D W, et al. Development of a hard X-ray split-delay system at the Linac Coherent Light Source[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10237: 102370R.
- [9] Roseker W, Hruszkewycz S O, Lehmkuhler F, et al. Towards ultrafast dynamics with split-pulse X-ray photon correlation spectroscopy at free electron laser sources[J]. Nature Communications, 2018, 9: 1704.
- [10] Gorobtsov O Y, Mukharamova N, Lazarev S, et al. Diffraction based Hanbury Brown and Twiss interferometry at a hard X-ray free-electron laser[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 2219.
- [11] Shinohara Y, Osaka T, Inoue I, et al. Split-pulse X-ray photon correlation spectroscopy with seeded X-rays from X-ray laser to study atomic-level dynamics[J]. Nature Communications, 2020, 11: 6213.
- [12] 梅理,崇毓华,朱宇鹏,等. 基于可调光延迟线的微波光子零中频接收机研究[J]. 中国激光, 2021, 48(9): 0906001.
Mei L, Chong Y H, Zhu Y P, et al. Optical delay line-based microwave photonic zero-intermediate-frequency receiver[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(9): 0906001.
- [13] 辛俊杰,李全勇,程爽,等. 太赫兹时域光谱系统快速旋转光学延迟线设计[J]. 中国激光, 2022, 49(6): 0614001.

- Xin Y J, Li Q Y, Cheng S, et al. Design of fast rotating optical delay line for terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(6): 0614001.
- [14] Goulielmakis E, Nersisyan G, Papadogiannis N A, et al. A dispersionless Michelson interferometer for the characterization of attosecond pulses[J]. *Applied Physics B*, 2002, 74(3): 197-206.
- [15] Smith R F, Dunn J, Nilsen J, et al. Refraction effects on X-ray and ultraviolet interferometric probing of laser-produced plasmas[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2003, 20(1): 254-259.
- [16] Roling S, Siemer B, Wöstmann M, et al. Temporal and spatial coherence properties of free-electron-laser pulses in the extreme ultraviolet regime[J]. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 2011, 14(8): 080701.
- [17] Roling S, Appel K, Braun S, et al. A hard X-ray split-and-delay unit for the HED experiment at the European XFEL[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9210: 92100B.
- [18] Osaka T, Hirano T, Yabashi M, et al. Development of split-delay X-ray optics using Si(220) crystals at SACLA [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9210: 921009.
- [19] Lu W, Friedrich B, Noll T, et al. Development of a hard X-ray split-and-delay line and performance simulations for two-color pump-probe experiments at the European XFEL [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(6): 063121.
- [20] Rysov R, Roseker W, Walther M, et al. Compact hard X-ray split-and-delay line for studying ultrafast dynamics at free-electron laser sources[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2019, 26(4): 1052-1057.
- [21] Xu Y H, Wu C, Fan J D, et al. Design of a hybrid split-delay line for hard X-ray free-electron lasers[J]. *Photonics*, 2022, 9(3): 136.
- [22] Roling S, Braun S, Gawlitza P, et al. A split- and delay-unit for the European XFEL[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8778: 87781G.
- [23] Roling S, Rollnik M, Kuhlmann M, et al. A soft X-ray split-and-delay unit for FLASH II[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10237: 1023712.
- [24] Osaka T, Hirano T, Morioka Y, et al. Characterization of temporal coherence of hard X-ray free-electron laser pulses with single-shot interferograms[J]. *IUCrJ*, 2017, 4(6): 728-733.
- [25] Li H Y, Sun Y W, Sutton M, et al. Design of an amplitude-splitting hard X-ray delay line with subnanoradian stability[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(7): 2086-2089.
- [26] Roseker W, Franz H, Schulte-Schrepping H, et al. Development of a hard X-ray delay line for X-ray photon correlation spectroscopy and jitter-free pump-probe experiments at X-ray free-electron laser sources[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2011, 18(3): 481-491.
- [27] Osaka T, Yabashi M, Sano Y, et al. A Bragg beam splitter for hard X-ray free-electron lasers[J]. *Optics Express*, 2013, 21(3): 2823-2831.
- [28] Hirano T, Osaka T, Morioka Y, et al. Performance of a hard X-ray split-and-delay optical system with a wavefront division[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2018, 25(1): 20-25.