

## 基于回声增强高次谐波产生的双色自由电子激光

张波<sup>1,2,3</sup>, 齐争<sup>3\*</sup>, 张文艳<sup>3\*\*</sup>, 冯超<sup>2,3</sup>, 赵振堂<sup>2,3</sup><sup>1</sup>中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800;<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;<sup>3</sup>中国科学院上海高等研究院上海光源中心, 上海 201204

**摘要** 基于回声增强高次谐波产生,提出了能够产生软X射线波段双色自由电子激光脉冲的方案,并对该方案进行了理论模拟和关键技术研究。研究给出了双色种子激光的产生方案,搭建了双色种子激光系统,该系统可以产生中心波长分别为 264.8 nm 和 265.3 nm、脉冲延时可调的双色种子激光。基于该双色种子激光,在模拟中最终可以得到波长分别为 5.884 nm 和 5.894 nm、峰值功率约为 300 MW、脉冲延时可调的软X射线双色自由电子激光辐射脉冲。

**关键词** X射线光学; 双色; 软X射线; 自由电子激光; 回声增强高次谐波产生

中图分类号 TN248.6 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221626

## 1 引言

X射线自由电子激光(XFEL)作为最新一代的X射线光源,具有极高的峰值亮度、全相干、可调谐以及超短脉冲等优点<sup>[1-3]</sup>,其应用涉及物理、化学、材料、生物和医学等多个领域<sup>[4-5]</sup>。自由电子激光装置一般由直线加速器和波荡器两部分构成,被加速至准光速的相对论性电子在通过波荡器的周期性磁场时摇摆前进,产生波荡器自发辐射,在辐射场和电子束的持续相互作用下,束流以光波长为周期受到调制,形成微聚束结构,进而发出相干辐射,此时辐射强度可以得到极大的提高。如果波荡器足够长,电子束的群聚会变得越来越强,辐射场的强度将沿轴向呈指数型增大,直到饱和。常见的自由电子激光(FEL)运行模式有自放大自发辐射(SASE)运行模式<sup>[6]</sup>和高增益高次谐波(HGHG)运行模式<sup>[7]</sup>。SASE不需要外部种子激光驱动,初始的辐射信号来源于电子束流噪声,电子束通过一个较长的波荡器就可以输出高功率的FEL。HGHG是外种子型自由电子激光的一种运行模式,其结构一般包含能量调制段、色散段和辐射段,利用高功率的外种子激光可以在束流中引入高次谐波分量,进而可以进行短波长全相干FEL产生和放大。

为满足实验用户的需求,双色自由电子激光成为研究热点,是目前国际上高增益自由电子激光研究的前沿方向。近年来国际上提出了多种产生双色FEL的可能方案,并开展了一些重要的原理验证性实验或

者用户实验。最早是美国的LCLS(Linac Coherent Light Source)采用发射度破坏技术产生了双色的FEL<sup>[8-9]</sup>,随后日本的SACLA也采用类似的方法实现了硬X射线双色FEL的产生<sup>[10]</sup>,并迅速开展了一些非常有影响力的用户实验<sup>[11]</sup>,这种双色FEL运行模式的优点在于其结构简单,光子能量和脉冲间距可以被非常方便地独立调谐,但是其脉冲能量一般较低,且中心波长和脉冲能量都会有较大幅度的抖动。2013年,LCLS的研究人员提出并验证了采用变参数波荡器来产生单脉冲双色FEL的方案<sup>[12]</sup>;2014年,LCLS验证了基于自种子SASE产生双色FEL的方案<sup>[13]</sup>,改善了双色FEL的纵向相干性和中心波长的稳定性;随后LCLS又完成了基于双脉冲电子束产生双色FEL的实验<sup>[14]</sup>;2016年LCLS利用Dechiper和校正子使单电子束团的头部和尾部在两段波荡器里分别产生了双色FEL<sup>[15]</sup>。上述双色FEL均是基于SASE产生,输出脉冲能量抖动较大,且双色FEL脉冲之间没有固定的相位关系,无法开展相位相关的FEL实验。

外种子型FEL可以有效改善SASE的纵向相干性。2013年意大利的FERMI基于HGHG运行模式,采用一个带有线性啁啾的种子激光脉冲对电子束进行调制,产生了超短的双色FEL<sup>[16]</sup>,采用这种方法时,两个辐射脉冲的长度不可以任意调节,脉冲间距和光谱间距也存在一定的依赖关系。为解决这些问题,FERMI随后提出了双色种子激光的方案,采用两束不同波长的短脉冲激光对电子束进行调制,再经过

收稿日期: 2022-08-19; 修回日期: 2022-09-09; 录用日期: 2022-09-19; 网络首发日期: 2022-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(12122514, 11975300)、上海市青年科技启明星(20QA1410100)

通信作者: \*qizheng@zjlab.org.cn; \*\*zhangwenyan@zjlab.org.cn

HGHG 产生双色的高次谐波 FEL 辐射<sup>[17]</sup>。由于两束种子激光的中心波长和时间间隔可以独立调谐,因此双色辐射脉冲的中心波长和相对时间延迟也可以调谐。基于该方案,FERMI 还实现了对双色 FEL 相对相位的锁模和精确控制<sup>[18]</sup>。目前 FERMI 基于 HGHG 的双色 FEL 已经开展了多个用户实验<sup>[19]</sup>,这些用户实验利用了外种子型 FEL 在时间相干性和相位控制方面的特点,充分体现了外种子型 FEL 在产生全相干双色 FEL 方面的优势,但是由于 HGHG 的谐波转换次数有限,双色 FEL 的辐射波长难以向更短的 X 射线波段拓展。

近年来,由 Stupakov 等<sup>[20-21]</sup>提出的回声增强高次谐波产生 (EEHG) 运行模式发展迅速,该模式可以有效地提高外种子电子激光的高次谐波转换效率,在正常的能量调制深度的条件下可以产生几十次谐波的微聚束,进而有可能利用单级 EEHG 产生全相干的软 X 射线 FEL,这为基于 EEHG 产生软 X 射线全相干双色 FEL 提供了新的可能,EEHG 也是我国上海软 X 射线自由电子激光 (SXFEL) 装置的基本运行模式之一<sup>[22]</sup>。本文提出了一种基于 EEHG 在 SXFEL 装置上产生双色 FEL 的新方案,利用双色种子激光,采用 EEHG 运

行模式,产生软 X 射线波段的双色 FEL,满足用户对全相干软 X 射线双色 FEL 的需求。

## 2 基本方案

如图 1 所示,所使用的种子激光为双色激光,且分成两路分别在调制段 M1 和 M2 中和束流相互作用,从直线加速器出来的电子束流会首先在 M1 中与第一路双色种子激光 (seed1) 相互作用,获得能量调制,然后束流会经过第一个强度较大的色散段 (DS1) 将其纵向相空间拉成精细的条状能带结构,在第二个能量调制段 M2 中束流和第二路双色种子激光 (seed2) 相互作用,条状能带结构会进一步被调制而产生更为精细的变化,经过第二个色散段 (DS2) 后,束流的纵向相空间会产生含有较高次谐波分量的微聚束,之后可以经过辐射段 R 来产生软 X 射线 FEL 辐射。由于 EEHG 的两路种子激光为同一束双色激光分光而来,因此最终产生的 FEL 辐射也是双色的,且可以通过调节双色种子激光中两个脉冲的中心波长和时间间隔来调节最终的双色 FEL 脉冲的中心波长和时间延迟。

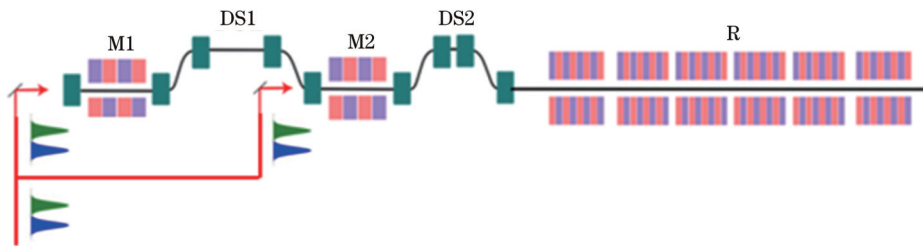


图 1 双色 EEHG 装置示意图

Fig. 1 Schematic of two-color EEHG device

## 3 双色种子激光系统

### 3.1 整体方案设计

双色种子激光是该方案实现全相干软 X 射线双色 FEL 的关键。SXFEL 装置可以兼容多种外种子 FEL 运行模式,是进行先进 FEL 原理和技术研究的理想平台,其现有的种子激光为常用的 800 nm 激光通过三倍频系统 (THG) 得到的紫外种子激光。根据双色 FEL 设计方案的需求,需要将种子激光改造为双色激光,且种子激光双脉冲的时间间隔和中心波长可连续独立调谐。参考国际上的相关方案,本文设计的双色种子激光系统如图 2 所示,其基本方案是将 800 nm 激光分光到两路三倍频系统,通过调节两路三倍频中偏硼酸钡 (BBO) 晶体的角度来独立调节输出紫外激光的中心波长,且在一路三倍频系统中加入时间延迟调节机构,之后将两路紫外激光合束得到实验所需的双色种子激光。

THG 常用的方法有延迟线和延迟片两种方法。延迟线方法需要 4 个反射镜来搭建延时装置,整体体

积比较大;延迟片方法则是基于  $\alpha$ -BBO 晶体或者方解石双折射特性,通过旋转延迟片的角度来实现 o 光和 e 光的延时。考虑到 SXFEL 种子激光实验室空间有限,双色种子激光系统是基于延迟片方法、在一块可移动的光学平板上搭建的,此外,受限于空间大小以及考虑延时调节范围 (0~1 ps) 的需求,选用光楔角对 (wedge pair) 方法来实现两路种子激光脉冲间距的调节,本实验用的是熔融石英 (fused silica) 光楔角 (FS wedges)。THG 系统基本设计如图 3 所示,基于延迟片、采用晶体级联方法,通过采用一块二倍频晶体与一块和频晶体级联产生三倍频光。Type I  $\beta$ -BBO 晶体作为倍频晶体,激光经过倍频晶体后再通过一个  $\alpha$ -BBO 晶体 (用于基频光和倍频光之间的延时调节),使 800 nm 光脉冲和 400 nm 光脉冲同步,由于和频晶体也选用 type I 型的  $\beta$ -BBO 晶体,因此需要一个 1/2 波片将 800 nm 光变成垂直偏振后一起入射到和频晶体上,最后产生水平偏振的 266 nm 紫外激光脉冲。

双色种子激光方案需要搭建两路 THG 系统,从常用的 800 nm 激光器出来的激光脉冲,通过一个

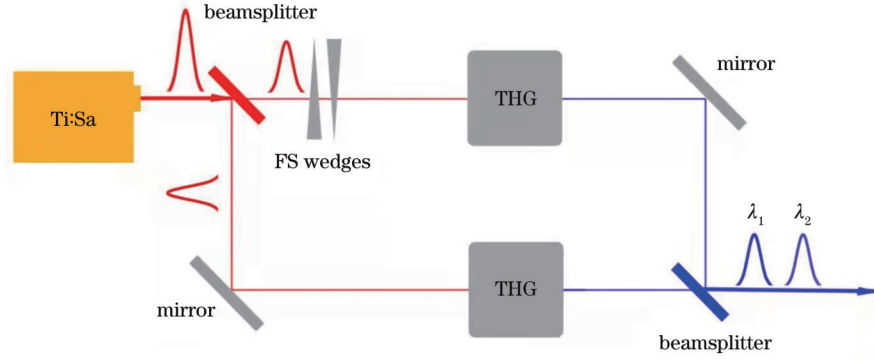


图 2 双色种子激光系统  
Fig. 2 Two-color seed laser system

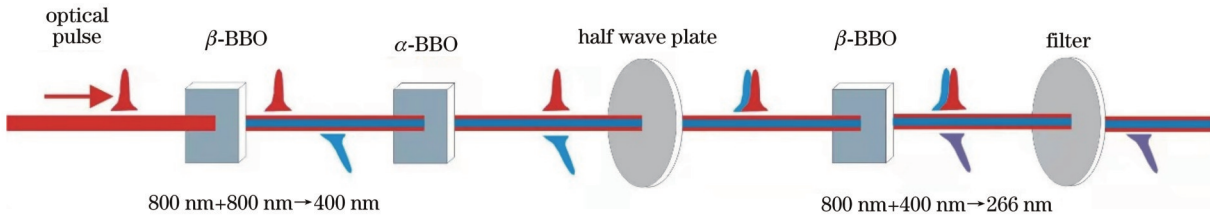


图 3 种子激光三倍频系统  
Fig. 3 Seed laser THG system

50:50 的红外分光镜分成两束进入两路 THG 系统, 两路 THG 转换输出的紫外光通过一个 50:50 的紫外合束镜的合束后形成双色激光。另外, 为了获得纯净的 266 nm 紫外激光, 还需要在装置后面加二色镜或者滤波片滤掉剩余的 800 nm 和 400 nm 光。

### 3.2 BBO 晶体设计

BBO 晶体是负单轴晶体, 在频率转换的过程中, 群速度色散对转换效率具有很大的影响, 很难同时满足相位匹配和群速度匹配。BBO 晶体相对于其他非线性晶体群速度色散要小得多, 因此实验中选用 BBO 晶体作为非线性转换的介质。BBO 晶体参数的计算需要根据输入激光脉冲的参数来具体确定, 其中, 相位匹配类型、相位匹配角以及晶体尺寸是需要关注的核心参数, 其性能直接决定了倍频和和频转换效率, 对实验影响重大。

BBO 是一种负单轴晶体, 它的 o 光折射系数 ( $n_o$ ) 要比 e 光折射系数 ( $n_e$ ) 大, 可通过 Sellmeier 方程来计算:

$$n_o^2 = 2.3759 + 0.01878 / (\lambda^2 - 0.01822) - 0.01354\lambda^2, \quad (1)$$

$$n_e^2 = 2.3753 + 0.01224 / (\lambda^2 - 0.01667) - 0.01516\lambda^2, \quad (2)$$

式中:  $\lambda$  是波长, 单位是  $\mu\text{m}$ 。通过角度调谐可获得 I、II 类的相位匹配。I 类和 II 类相位匹配的 BBO 晶体有效倍频系数  $d_{1,\text{eff}}$  和  $d_{2,\text{eff}}$  分别为

$$d_{1,\text{eff}} = d_{31} \sin \theta + (d_{11} \cos 3\phi - d_{22} \sin 3\phi) \cos \theta, \quad (3)$$

$$d_{2,\text{eff}} = (d_{11} \sin 3\phi + d_{22} \cos 3\phi) \cos 2\theta, \quad (4)$$

式中:  $d_{11}$ 、 $d_{22}$ 、 $d_{31}$  为非线性光学系数,  $\theta$ 、 $\phi$  为晶体的相位匹配角。基于延迟片的 THG 系统倍频 BBO 晶体与和频 BBO 晶体都选取 I 类匹配, 最佳相位匹配角计算采用 SNLO 软件模拟 BBO 晶体的匹配角等相关参数, 仿真结果为: 对于倍频晶体,  $\theta = 29.2^\circ$ ,  $\phi = 0^\circ$ , 厚度  $L = 0.5 \text{ mm}$ ; 对于和频晶体,  $\theta = 44.3^\circ$ ,  $\phi = 0^\circ$ ,  $L = 0.2 \text{ mm}$ 。

倍频晶体使得 800 nm 的 o 光与 400 nm 的 e 光产生 154.4 fs 的延时, 要用  $\alpha$ -BBO 晶体来补偿这个时间差, 根据  $\alpha$ -BBO 晶体的 Sellmeier 方程可以算出  $\alpha$ -BBO 晶体厚度为 0.4765 mm。

### 3.3 光楔角对

一般可以用于时间延时的装置有三种: 后向反射镜、四反射镜装置和光楔角对, 由于实验要求两束光之间的时间差 (0~1 ps) 可调, 根据  $L = ct$ , 调节距离为 0~0.3 mm。因此选用小范围可调的光楔角对作为本实验的延时装置。光楔角对中一个光楔角固定, 另外一个安装在电动平移台上, 使其可以沿垂直光轴方向移动。光楔角对改变的时间延迟可表示为

$$\Delta\tau = \Delta l (n - 1) \tan \delta, \quad (5)$$

式中:  $\Delta\tau$  为光楔角对的延时步长;  $\Delta l$  为电动平移台的步长;  $n$  为光楔角的折射率;  $\delta$  为光楔角的角度。

### 3.4 双色种子激光搭建和实测结果

根据上面的设计方案, 购置了光学元件并搭建了双色种子激光系统, 如图 4 所示。针对双色 FEL 实验对激光脉冲间距和中心波长的调节指标的需求, 进行了种子激光系统实验参数测试。

首先分别测试了两路 THG 产生的紫外波长激光





图 4 双色种子激光装置实物图

Fig. 4 Experimental setup for two-color seed laser device

脉冲,测量结果如图 5(a)所示,实验结果表明两路

THG 均可很好地实现三倍频的产生,得到波长在 266 nm 附近的紫外激光脉冲。同时还测量了 THG 的转换效率,测量结果如图 5(b)所示,THG 最高转换效率可超过 25%,满足双色 FEL 实验对于种子激光功率的需求。最后测试了双色种子激光脉冲的中心波长和相对延迟的调节能力,测试结果如图 6 所示,双色种子激光的中心波长可以通过调节每路 BBO 的倾角进行独立调节,两路种子激光的中心波长差可大于 1 nm。测试得到的双色种子激光中心波长分别为 264.85 nm 和 266.28 nm。采用互相关法测量双色激光的脉宽以及时间间隔,测试得到单个紫外激光脉冲的宽度均为 170 fs 左右,而两个脉冲之间的时间间隔约为 2 ps,通过调节光楔角对,可以进一步在 0~1 ps 之间自由改变两束紫外光的时间间隔。

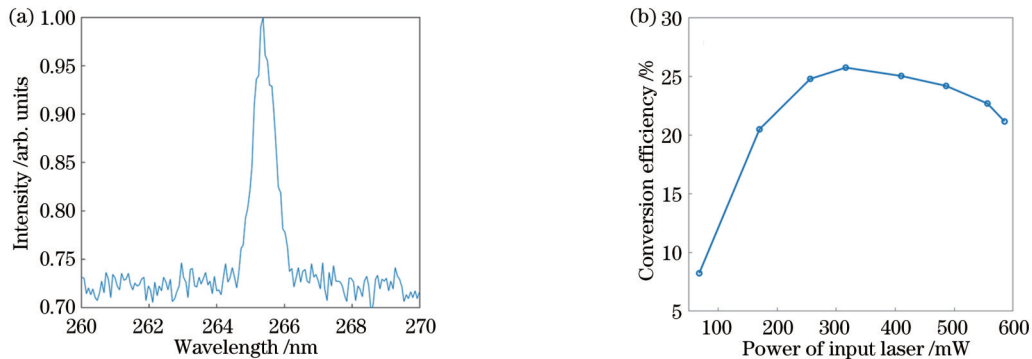


图 5 三倍频产生的紫外波长激光脉冲与三倍频转换效率。(a)三倍频产生的紫外波长激光脉冲;(b)三倍频转换效率

Fig. 5 Ultraviolet laser pulse generated by THG and conversion efficiency of THG. (a) Ultraviolet laser pulse generated by THG; (b) conversion efficiency of THG

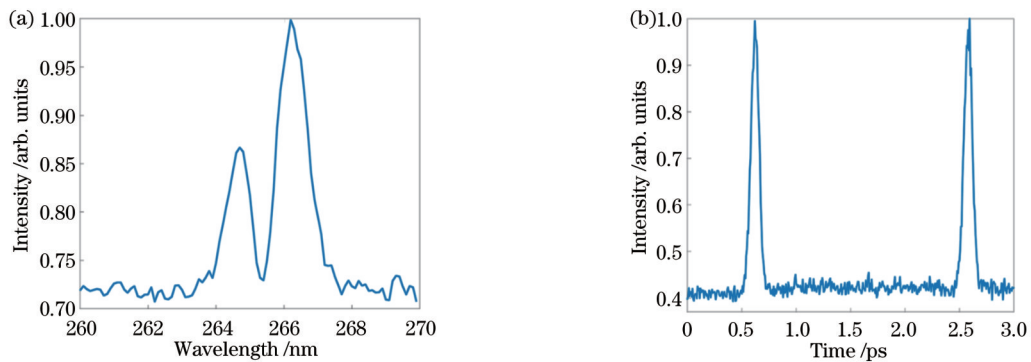


图 6 双色种子激光光谱与脉冲时间延迟测试结果。(a)双色种子激光光谱;(b)脉冲时间延迟

Fig. 6 Spectrum and time delay of two-color seed laser. (a) Spectrum of two-color seed laser; (b) pulse time delay

## 4 双色 FEL 模拟

利用上述双色种子激光,根据 SXFEL 的典型参数,进行了束流和 FEL 模拟研究,用 GENESIS<sup>[23]</sup> 软件进行三维数值模拟。SXFEL 的主要运行参数在表 1 中给出,模拟中采用的电子束能量为 1.6 GeV,发射度约为 1.5 mm·mrad,束长约为 800 fs [半峰全宽 (FWHM)],峰值流强约为 700 A,双色种子激光的中

心波长分别为 264.8 nm 和 265.3 nm。表 1 中  $N_s$  是波荡器段数,  $N_p$  是每节波荡器周期数,  $\lambda_u$  为波荡器周期长度,  $R_{56}$  为纵向色散。为了产生软 X 射线波段的 FEL 辐射,将 EEHG 优化在种子激光的 45 次谐波上,所需两路种子激光的脉冲能量分别为 200 MW 和 120 MW,对应的能量调制深度分别为 7.5 和 6,两个色散段的纵向色散  $R_{56}$  分别为 7.84 mm 和 0.18 mm,所用的波荡器是 Seeding 线的 6 台 U30 波荡器,最终期望产生的双色

FEL 波长分别为 5.884 nm 和 5.894 nm。

图 7 和图 8 给出了利用以上参数进行的束流模拟和 FEL 模拟的结果。图 7 是电子束流在波荡器入口处

表 1 主要参数

Table 1 Main parameters

Parameter	Value
Beam energy /GeV	1.6
Charge /pC	500
Slice energy spread /%	0.01
Normalized emittance /( $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$ )	1.0
Full bunch length /fs	800
Peak current /A	700
Seed wavelength /nm	264.8, 265.3
Seed pulse length /fs	160
Seed power /MW	100
$N_p\lambda_u$ of M1 /cm	$20\times 8$
$N_p\lambda_u$ of M2 /cm	$20\times 8$
$R_{56}$ of DS1 /mm	7.84
$R_{56}$ of DS2 /mm	0.18
$N_s N_p \lambda_u$ of M1 /cm	$6\times 100\times 3$
FEL wavelength /nm	5.884, 5.894

的 45 次谐波的群聚因子,可以看到束流初始的群聚出现在双脉冲对应的位置上,且群聚因子都能达到约 0.10。图 7 中横轴  $s$  代表束流纵向的位置。图 8 给出了最终的双色双脉冲 FEL 辐射的功率和光谱结果,可以看到最终得到的双色 FEL 的中心波长与理论一致,为 5.884 nm 和 5.894 nm,光子能量差距约为 0.5 eV,双脉冲的辐射功率都可以到 300 MW 左右,两个脉冲的时间延迟约为 500 fs,与种子激光的时间延迟一致。

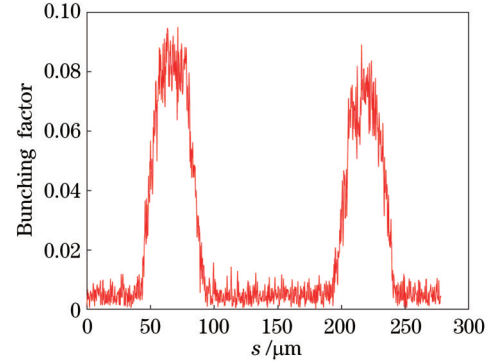


图 7 波荡器入口处束流的 45 次谐波群聚因子

Fig. 7 Bunching factor of 45th harmonic at entrance of undulator section

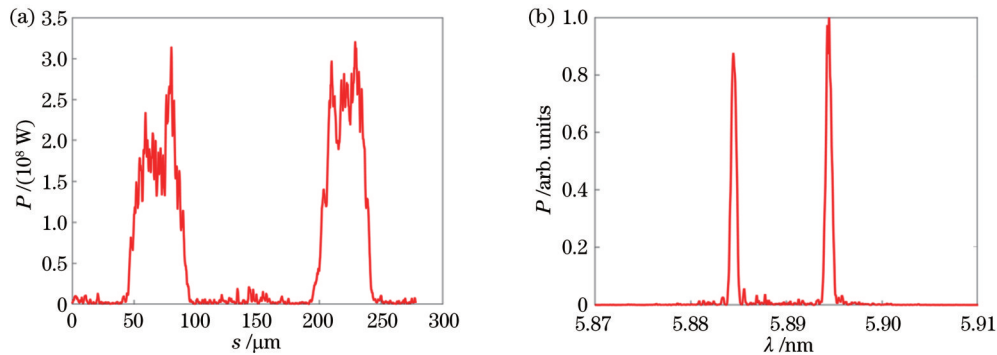


图 8 软 X 射线双色 FEL 功率和光谱。(a) 功率  $P$ ; (b) 光谱

Fig. 8 Power and spectrum of soft X-ray two-color FEL. (a) Power  $P$ ; (b) spectrum

## 5 结 论

基于 EEHG 运行模式和上海 SXFEL 装置,提出了一种新的产生全相干双色软 X 射线 FEL 脉冲的方法。研究中设计并搭建了关键的双色种子激光系统,并对其性能进行了测试。测试结果表明:此关键光学系统可以很好地满足双色实验需求,为今后在 SXFEL 装置上开展双色 FEL 实验提供了基础。根据上海 SXFEL 装置的实际束流参数,利用中心波长分别为 264.8 nm 和 265.3 nm、时间间隔约为 500 fs 的双色双脉冲种子激光,进行了三维的 FEL 数值模拟,模拟结果表明最终可以获得中心波长分别为 5.884 nm 和 5.894 nm、峰值功率约为 300 MW、脉冲延迟与种子激光延迟一致的双色软 X 射线 FEL 辐射脉冲。

在实际进行 FEL 产生和放大时,束流本身的能量啁啾、双色种子激光的中心波长差距一般均不能超过 FEL 增益带宽范围(对于软 X 射线 FEL,约为  $2.0\times 10^{-3}$ ),否则双色脉冲无法被同时放大。在利用双色种子激光进行 EEHG 调制时,为了能同时满足 EEHG 的优化条件,要保证两个中心波长处的脉冲强度是基本相同的。

## 参 考 文 献

- [1] Emma P, Akre R, Arthur J, et al. First lasing and operation of an ångstrom-wavelength free-electron laser[J]. Nature Photonics, 2010, 4(9): 641-647.
- [2] Allaria E, Appio R, Badano L, et al. Highly coherent and stable pulses from the FERMI seeded free-electron laser in the extreme ultraviolet[J]. Nature Photonics, 2012, 6(10): 699-704.
- [3] Huang N S, Deng H X, Liu B, et al. Features and futures of

- X-ray free-electron lasers[J]. *The Innovation*, 2021, 2(2): 100097.
- [4] Chapman H N. X-ray free-electron lasers for the structure and dynamics of macromolecules[J]. *Annual Review of Biochemistry*, 2019, 88: 35-58.
- [5] Bostedt C, Boutet S, Fritz D M, et al. Linac coherent light source: the first five years[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2016, 88: 015007.
- [6] Bonifacio R, Pellegrini C, Narducci L M. Collective instabilities and high-gain regime in a free electron laser[J]. *Optics Communications*, 1984, 50(6): 373-378.
- [7] Yu L H. Generation of intense UV radiation by subharmonically seeded single-pass free-electron lasers[J]. *Physical Review A*, 1991, 44(8): 5178-5193.
- [8] Feng C, Ding Y, Huang Z, et al. Two-color FEL schemes based on emittance-spoiler technique[EB/OL]. [2022-03-05]. <https://accelconf.web.cern.ch/FEL2012/papers/thpd56.pdf>.
- [9] Lutman A A, Coffee R, Ding Y, et al. Experimental demonstration of femtosecond two-color X-ray free-electron lasers[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(13): 134801.
- [10] 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.
- [11] Yoneda H, Inubushi Y, Nagamine K, et al. Atomic inner-shell laser at 1.5-ångström wavelength pumped by an X-ray free-electron laser[J]. *Nature*, 2015, 524(7566): 446-449.
- [12] Marinelli A, Lutman A A, Wu J, et al. Multicolor operation and spectral control in a gain-modulated X-ray free-electron laser[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(13): 134801.
- [13] Lutman A A, Decker F J, Arthur J, et al. Demonstration of single-crystal self-seeded two-color X-ray free-electron lasers[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(25): 254801.
- [14] Marinelli A, Ratner D, Lutman A A, et al. High-intensity double-pulse X-ray free-electron laser[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6369.
- [15] Lutman A A, Maxwell T J, MacArthur J P, et al. Fresh-slice multicolour X-ray free-electron lasers[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(11): 745-750.
- [16] de Ninno G, Mahieu B, Allaria E, et al. Chirped seeded free-electron lasers: self-standing light sources for two-color pump-probe experiments[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(6): 064801.
- [17] Allaria E, Bencivenza F, Borghes R, et al. Two-colour pump-probe experiments with a twin-pulse-seed extreme ultraviolet free-electron laser[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2476.
- [18] Gauthier D, Ribić P R, de Ninno G, et al. Generation of phase-locked pulses from a seeded free-electron laser[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(2): 024801.
- [19] Ferrari E, Spezzani C, Fortuna F, et al. Widely tunable two-colour seeded free-electron laser source for resonant-pump resonant-probe magnetic scattering[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 10343.
- [20] Stupakov G. Using the beam-echo effect for generation of short-wavelength radiation[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(7): 074801.
- [21] Xiang D, Stupakov G. Echo-enabled harmonic generation free electron laser[J]. *Physical Review Special Topics: Accelerators and Beams*, 2009, 12(3): 030702.
- [22] Liu B, Feng C, Gu D, et al. The SXFEL upgrade: from test facility to user facility[J]. *Applied Sciences*, 2021, 12(1): 176.
- [23] Reiche S. GENESIS 1.3: a fully 3D time-dependent FEL simulation code[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1999, 429(1/2/3): 243-248.

## Two-Color Free Electron Laser Based on Echo-Enabled Harmonic Generation

Zhang Bo<sup>1,2,3</sup>, Qi Zheng<sup>3\*</sup>, Zhang Wenyan<sup>3\*\*</sup>, Feng Chao<sup>2,3</sup>, Zhao Zhentang<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>Shanghai Synchrotron Radiation Facility, Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China

### Abstract

**Objective** As the latest generation of X-ray light sources, X-ray free electron lasers (XFELs) have the advantages of extremely high peak brightness, full coherence, tunability, and ultrashort pulses. They have been applied to many state-of-the-art scientific research fields such as physics, chemistry, materials, biology, medicine, and so on.

In order to meet users' experimental requirements, the two-color FEL has attracted wide attention from the high-gain FEL research community worldwide. In recent years, lots of methods have been proposed, and some experiments have been carried out for the generation of the two-color FEL. Yet they are mostly based on a self-amplified spontaneous emission (SASE) FEL which lacks longitudinal coherence.

In this paper, we proposed a new method to generate fully coherent two-color soft XFELs (SXFEL) based on echo-enabled harmonic generation (EEHG). Key technologies were studied, and a three-dimensional FEL simulation was demonstrated.

**Methods** Our scheme basically involves a conventional EEHG configuration, which consists of two energy modulation sections, namely, M1 and M2, two dispersion sections, namely, DS1 and DS2, and a long undulator section, namely,

R. The electron beam obtained from the upstream of a linear accelerator (LINAC) will interact with seed1 in M1 to get an energy modulation with an amplitude of 7.5. Then the electron beam is sent to the strong dispersion section DS1 with  $R_{56}$  at 7.84 mm to stretch the longitudinal phase space of the electron beam to form a periodic structure. Seed2 will imprint another energy modulation with an amplitude of 6 into the electron beam. The second dispersion section DS2 with  $R_{56}$  at 0.18 mm will convert the energy modulation into harmonic density modulation, and the electron beam will then go through the radiator R to generate FEL radiation.

According to the requirements of the two-color FEL generation, it is necessary to transform the seed laser system into two-color lasers, in which the central wavelength and time delay of the two-color seed laser pulses can be continuously and independently adjusted. Hence we designed a two-color seed laser system. The basic technique is to split an 800 nm infrared laser into two identical beams and send them into two third harmonic generation (THG) systems. The central wavelength of the two output ultraviolet (UV) lasers can be tuned independently according to different angles of BBO crystal in the two THG systems, and the time delay can be adjusted through an optical wedge pair inserted into the THG system. By integrating the two UV lasers, we can obtain the two-color seed lasers required by the two-color FEL generation.

**Results and Discussions** The central wavelength of the two-color seed lasers we measured experimentally was 264.85 nm and 266.28 nm, respectively. At the same time, we measured the pulse duration and the time delay of the two-color seed lasers. The width of a single UV laser pulse was about 170 fs, and the time interval between the two pulses was about 2 ps (Fig. 6). By adjusting the optical wedge pair, the time delay between the two UV beams can be further adjusted to 0–1 ps. The central wavelength difference can also be changed accordingly.

In the numerical simulation, we adopted two-color seed laser pulses with their central wavelengths being 264.8 nm and 265.3 nm, respectively, and their time delay was about 500 fs. The FEL simulation results indicate that by using these two-color seed laser pulses, we could achieve two-color SXFELs with their wavelengths being 5.884 nm and 5.894 nm, respectively. In addition, their peak power was about 300 MW, and their time delay was consistent with that of the seed lasers (Fig. 8).

It should be pointed out that in a practical FEL generation and amplification process, the energy chirp of the electron beam itself and the central wavelength difference of the two-color seed laser pulses cannot exceed the FEL gain bandwidth (for SXFEL, the value is about  $2.0 \times 10^{-3}$ ). Otherwise, the two-color FEL pulses cannot be amplified simultaneously. In order to satisfy the EEHG optimization conditions, it is necessary to ensure that the pulse intensities of the two-color seed laser pulses are basically the same.

**Conclusions** On the basis of the EEHG scheme and Shanghai SXFEL facility, a new method for generating fully coherent two-color SXFEL pulses was proposed in this paper. In the study, we designed and set up a two-color seed laser system and tested its performance. The results show that this key optical system can meet the requirements of two-color FEL generation. By using two-color seed lasers with their central wavelengths of 264.8 nm and 265.3 nm, respectively, as well as a time delay of about 500 fs, we performed a three-dimensional FEL simulation based on the practical parameters of the SXFEL facility. The simulation results indicate that we can eventually generate two-color SXFEL radiation pulses with their central wavelengths being 5.884 nm and 5.894 nm, respectively, as well as peak power being about 300 MW.

**Key words** X-ray optics; two-color; soft X-ray; free electron laser; echo-enabled harmonic generation