



·粒子束及加速器技术·

基于束流相空间拍频产生锁模自由电子 激光的物理机制研究*

张 波^{1,2}, 齐 争³, 冯 超^{2,3}, 赵振堂^{2,3}

(1. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院上海高等研究院, 上海光源中心, 上海 201204)

摘 要: 提出基于束流相空间拍频产生锁模多色自由电子激光的方案, 利用带有能量啁啾的电子束流和上海软 X 射线自由电子激光装置 (SXFEL) 上的两个调制段-色散段结构, 在束流中通过拍频形成多个流强脉冲串, 并在此基础上进行高次谐波辐射, 产生锁模多色自由电子激光辐射脉冲。模拟结果表明, 利用 264 nm 的种子激光, 可在束流中形成 18 次谐波的群聚分量, 并能最终产生中心波长约 14.58 nm 的锁模多色 FEL 辐射。

关键词: 自由电子激光; 锁模; 拍频; 束流操控

中图分类号: TN248.6

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.230090

Research on physical mechanism of mode-locked free-electron laser based on electron beam phase space beating

Zhang Bo^{1,2}, Qi Zheng³, Feng Chao^{2,3}, Zhao Zhentang^{2,3}

(1. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China)

Abstract: The theory, method, and experimental studies on mode-locked free-electron laser (FEL) have been of great interests in the world. In this paper, we propose a method to generate mode-locked multi-color free-electron laser radiation pulses based on the electron beam phase space beating. Utilizing an electron beam with head-tail energy chirp and the two modulator-chicane setups in the Shanghai Soft X-ray free-electron laser facility (SXFEL), multiple current pulse trains can be formed and mode-locked multi-color free electron laser pulses can be generated. The simulation results indicate that, with the help the 264 nm seed laser, bunching factor at the 18th harmonic of the seed laser can be formed and ultimately mode-locked multi-color FEL radiation pulse with a central wavelength of approximately 14.58 nm can be generated. This study is of great significance for the development of the mode-locked FEL in China and the performance improvement of the SXFEL facility.

Key words: free electron laser, mode-locking, frequency beating, beam manipulation

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^[1-3], 其应用涉及物理、化学、材料、生物和医学等多个领域^[4-5]。自由电子激光是一种使用相对论性电子束团通过周期性变化的磁场以进行相干辐射放大的新型光源, 通常由注入器、直线加速器和波荡器段等组成, FEL 可按低增益和高增益两种放大机制分类, 低增益 FEL 的放大器部分由波荡器和光学谐振腔组成, 而高增益 FEL 的放大器通常仅由波荡器或外加常规种子激光系统组成。

自从 FEL 成功运行以来, 人们在不断研究更加优良的运行模式和辐射性能, 锁模自由电子激光就是其中之一。2008 年, Thompson N R 和 McNeil B W J 研究了锁模自由电子激光的基本物理原理和工程实现方法, 并首次提出了利用周期性变化的束流能量调制来进行锁模自由电子激光辐射的方法^[6]。2011 年, Kur E 等人提出了一种类

* 收稿日期: 2023-04-18; 修订日期: 2023-07-14

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

联系方式: 张 波: zhangbo2@sinap.ac.cn。

似的方法,即利用电子束密度的周期性变化来实现锁模 FEL 辐射^[7]。束流能量或密度的周期性分布是产生自由电子激光辐射脉冲串的前提,这是产生锁模自由电子激光的必要条件。2012 年,向导等人提出使用软 X 射线自种子单色器中选出的单色信号和束流中的微聚束串来进行锁模 FEL 辐射的方法^[8],由于单色信号的时间分布相对较宽,并且纵向相干性具有固定的相位关系,因此可以实现锁模。同年,冯超等人和 Henderson J R 等人各提出了一种基于不同改进的回声增强高次谐波产生 (EEHG) 生成具有良好纵向一致性的锁模 FEL 的方法^[9-10],该方法主要使用改进的 EEHG 结构生成一系列高次谐波脉冲串,然后通过锁模波荡器结构进行锁模 FEL 放大。2013 年,Thompson N R 和 McNeil B W J 提出了一种能生成只有几个光学周期的锁模 FEL 脉冲的方法^[11],首先,束流受到具有周期性分布的相对大的能量调制,然后通过常规波荡器进行 FEL 辐射,通过调整波荡器的共振关系,使得只有具有特定能量的部分光束可以被辐射放大,而大部分其他束流不被辐射放大,从而在束流中形成周期性纵向微聚束,其间隔仅为硬 X 射线的波长水平,最后,群聚后的束流经由专门设计的后放大器结构来进行锁模 FEL 放大。理论上,它将产生一个短至仄秒 (zs)、只有几个光学周期的锁模 FEL 脉冲序列。2020 年,意大利的 FERMI 在实验中首次获得了极紫外波段的锁模 FEL^[12],FERMI 使用 HGHG (高增益高次谐波) 的外种子模式,使用特定的波荡器-移相器结构产生 3~4 个不同谐波次数的 FEL 辐射,并通过改变段间的移相器来改变了谐波 FEL 辐射的相对相位关系,最终通过几个辐射脉冲的波形合成产生单脉冲宽度约为 230 as,具有较高的锁模频谱信噪比的锁模 FEL 辐射。2021,FERMI 开展了进一步的研究,提出了该过程中不同高次谐波辐射的阿秒波形合成问题^[13],指出该方法理论上可以产生小于 100 as 的锁模 FEL 辐射,有望成为国际上通用的实现锁模 FEL 的方法。

本文提出了基于束流相空间拍频产生锁模多色自由电子激光的方案,利用带有能量啁啾的电子束流和上海软 X 射线自由电子激光装置 (SXFEL) 上的两个调制段-色散段结构,在束流中通过拍频形成多个流强脉冲串,并在此基础上进行高次谐波辐射,产生锁模多色自由电子激光辐射脉冲。

1 锁模多色自由电子激光产生方案

本研究方案采用束流相空间拍频的方法,利用带有能量啁啾的电子束流和 SXFEL 上的两个调制段-色散段结构,让两束种子激光分别和束流相互作用,在束流中通过拍频产生流强脉冲串,之后再利用电子束密度的周期性变化来实现锁模 FEL 辐射。图 1 为本文方案基本结构与束流纵向相空间变化示意图,图中横轴 s 代表电子纵向位置,纵轴 γ 表示电子能量 (是实际能量与静止能量之比)。该方案的基本结构主要由两部分组成:常规的两组调制段 (M1, M2)-色散段 (DS1, DS2) 以对束流进行能量和密度调制,辐射段放大锁模 FEL。为了在能量调制中进行束流相空间拍频,需要使两束激光的中心波长有一定的差异,本文使用两束中心波长相同的调制激光,给束流设定一定的初始能量啁啾,结合第一级能量调制之后的色散段,此能量啁啾可以使束流的纵向能量调制的长度产生一定的偏移,相当于实现了第一个种子激光的中心波长的调整。图 1(a) 为进入第一个调制段之前的束流相空间的图像,电子束团的头部和尾部有一定的能量啁啾。图 1(b) 为经过第一个调制段和色散段后,第二个调制段之前的束流相空间,可以看到经过第一个调制段后束流能散变大。图 1(c) 为进入波荡器段之前的束流相空间,此时束流相空间已经形成了明显的拍频结构。

下面对该方案进行理论分析,定义电子能量对电子束中心能量 $p = (\gamma - \gamma_0) / \sigma_\gamma$, 其中: γ_0 是束流的平均能量, σ_γ 是束流的均方根能散。则束流初始分布

$$f(p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}p^2\right) \quad (1)$$

给束流加上线性的能量啁啾并且经过第一个能量调制段后,电子束能量调制的大小呈正弦分布,即

$$p_1 = p + c \frac{\gamma_0}{\sigma_\gamma \sigma_s} s + A_1 \sin(k_1 s) \quad (2)$$

式中: c 是线性的相对能量啁啾, σ_s 为电子束的束长, A_1 是能量调制深度, k_1 是种子激光波数。经过第一个色散段后,束流的纵向位置发生变化,为

$$s_1 = s + R_{56,1} p_1 \sigma_\gamma / \gamma_0 \quad (3)$$

式中: $R_{56,1}$ 为第一个色散段的纵向色散。此时束流分布为

$$f(p, s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[p - c \frac{\gamma_0}{\sigma_\gamma \sigma_s} (s - R_{56,1} p \sigma_\gamma / \gamma_0) - A_1 \sin(k_1 (s - R_{56,1} p \sigma_\gamma / \gamma_0))\right]^2\right\} \quad (4)$$

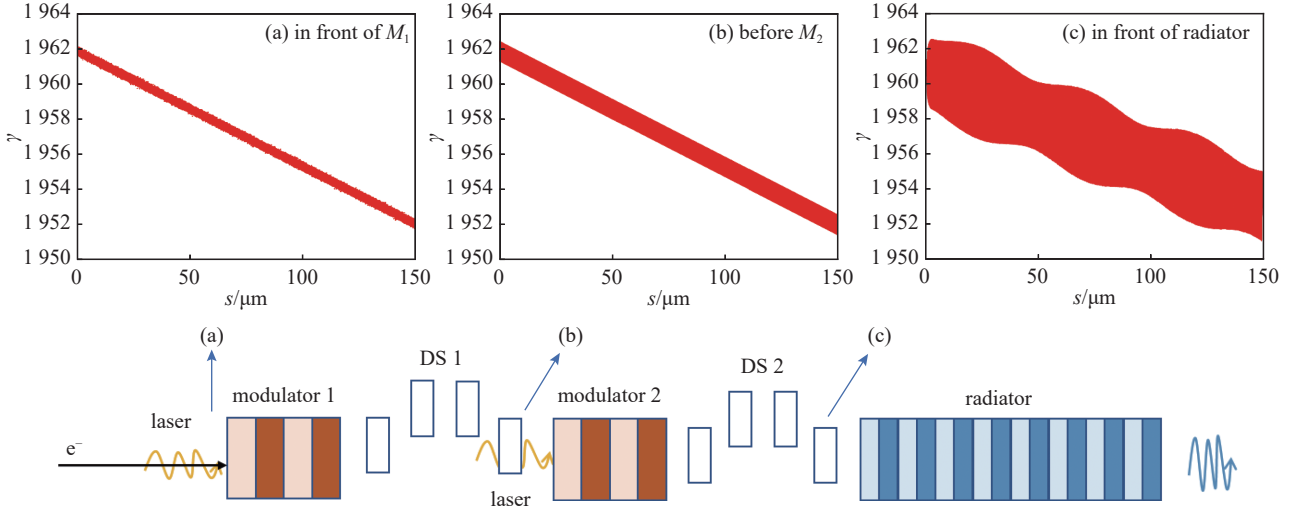


Fig. 1 Schematic layout and the electron beam phase space evolution of our proposed method

图 1 方案基本结构与束流纵向相空间变化示意图

定义 $C = \frac{c\gamma_0}{\sigma_\gamma\sigma_s}$, $\xi = k_1s$, $B_1 = R_{56,1}k_1\sigma_\gamma/\gamma_0$, 则式(4)可简化为

$$f(p, \xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}[p - C\xi/k_1 + CB_1p/k_1 - A_1\sin(\xi - B_1p)]^2\right\} \quad (5)$$

经过第二个能量调制段(A_2)和第二个色散段后, 束流的能量和纵向位置分别变为

$$\begin{cases} p_2 = p_1 + A_2 \sin \xi \\ s_2 = s_1 + R_{56,2}p_2\sigma_\gamma/\gamma_0 \end{cases} \quad (6)$$

此时的束流分布为

$$f(p, \xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left\{p - A_2\sin(\xi - B_2p) - C/k_1[\xi - (B_1 + B_2)p + A_2B_1\sin(\xi - B_2p)] - A_1\sin[\xi - (B_1 + B_2)p + A_2B_1\sin(\xi - B_2p)]\right\}^2\right\} \quad (7)$$

式中: $B_2 = R_{56,2}k_1\sigma_\gamma/\gamma_0$, 这里 $R_{56,2}$ 为第二个色散段的纵向色散。将式(7)对 p 进行积分, 可以得到束流的纵向密度分布函数 $N(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi, p)dp$, 因此束流中 n 次谐波的群聚因子可写为

$$b_n = \left| \left\langle e^{-in\xi} N(\xi) \right\rangle \right| \quad (8)$$

根据公式(7)给出束流的分布如图2所示。

2 束流和 FEL 模拟

采用 SXFEL 用户装置的基本束流参数, 来进行束流和 FEL 模拟, 基本参数如表1所示。束流的中心能量为 1 GeV, 切片能散为 0.4×10^{-5} , 横向发射度为 $1 \mu\text{m}\cdot\text{rad}$, 束长为 $150 \mu\text{m}$, 为方便模拟假定束流纵向为均匀分布, 且初始流强为 1500 A, 给定束流头尾的能量啁啾约为中心能量的 0.5%, 两个调制段中所用种子激光的中心波长均为 264 nm, 两级能量调制所用的种子激光功率分别为 52 MW 和 100 MW, 两个色散

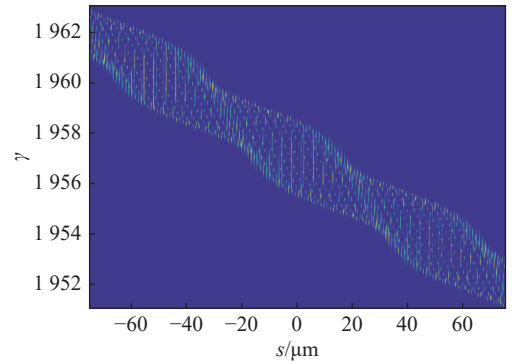


Fig. 2 Electron beam longitudinal phase space distribution

图 2 束流纵向相空间分布

表 1 主要参数

Table 1 Main Parameters

beam energy/GeV	energy spread	peak current/A	emittance (RMS)/($\mu\text{m}\cdot\text{rad}$)	wavelength/nm	peak power of seed1/MW	peak power of seed2/MW	$R_{56,1}/\mu\text{m}$	$R_{56,2}/\mu\text{m}$
1	0.4×10^{-5}	1500	1.0	264	52	100	160	30

段的强度分别为 $160\ \mu\text{m}$ 和 $30\ \mu\text{m}$, 最终产生种子激光的 18 次谐波、中心波长约为 $14.58\ \text{nm}$ 的锁模 FEL 辐射。

根据表 1 所示参数, 本文采用 GENESIS^[14] 软件进行了三维的 FEL 数值模拟, 得出束流 18 次谐波的初始束流群聚因子、FEL 辐射脉冲和光谱结果, 如图 3 所示, 可以看出, 通过选择合适的束流和结构参数, 可获得了周期性密度调制的束流。在波荡器入口处 18 次谐波的群聚因子 b_{18} 最大约为 0.12, 并且出现了 3 个群聚的峰值, 每个群聚峰值的半高宽大概为 $20\ \mu\text{m}$ 。将该束流送到波荡器中进行锁模 FEL 辐射, 让波荡器共振在种子激光的 18 次谐波上, 即 $14.67\ \text{nm}$ 。由于共振波长较长 FEL 增益较快, 且束流密度调制的周期也很宽, 所以可以不必考虑滑移效应, 直接用常规波荡器来进行放大。最终的锁模多色 FEL 辐射结果如图 4 所示, 可以看到, 最终在时域上获得了峰值功率约为 $1\ \text{GW}$ 的三个辐射脉冲串, 而频域上也是一系列分立的锁模光谱结构。光谱的中心波长约为 $14.58\ \text{nm}$, 该中心波长相比于种子激光的 18 次谐波较短, 这是由于束流本身有比较大的能量啁啾, FEL 的中心波长产生了偏移。

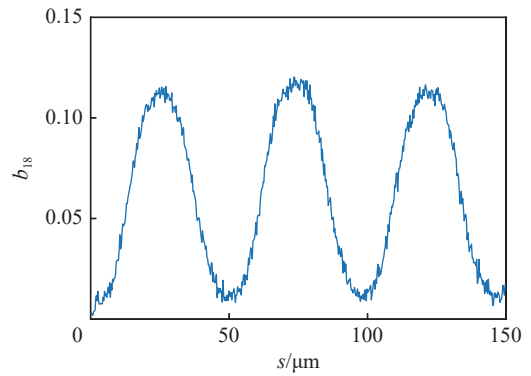


Fig. 3 The 18th harmonic bunching factor at the entrance of the undulator section

图 3 波荡器入口处束流中的 18 次谐波群聚因子

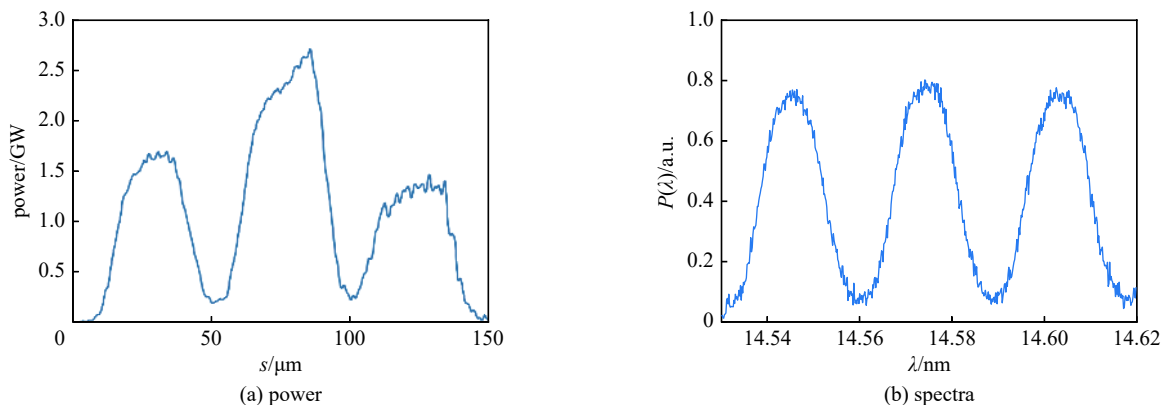


Fig. 4 Mode-locked FEL radiation power and spectra

图 4 锁模 FEL 功率和光谱

3 结论

本文介绍了一种能够产生超快双色 X 射线自由电子激光的新方案, 该方案使用 $264\ \text{nm}$ 的种子激光, 最终产生约 $14.67\ \text{nm}$ 的锁模 FEL 辐射, 提高了激光束流操控和密度调制的效率, 降低所需的种子激光功率, 并提高最终的超快双色 XFEL 脉冲的信噪比。改善了诸如 FERMI 的实验方案——基于 HGHG 外种子模式, 谐波转换次数较低, 难以产生波长更短的 X 射线锁模 FEL 辐射的缺点。在未来的研究工作中我们将依托 SXFEL 用户装置, 进行软 X 射线波段的锁模 FEL 的理论方案与实验研究, 有助于我国 FEL 装置性能的提高和未来先进的锁模 FEL 用户实验。

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 Nanshun, Deng Haixiao, Liu Bo, et al. Features and futures of X-ray free-electron lasers[J]. *The Innovation*, 2021, 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] Thompson N R, McNeil B W J. Mode locking in a free-electron laser amplifier[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100: 203901.
- [7] Kur E, Dunning D J, McNeil B W J, et al. A wide bandwidth free-electron laser with mode locking using current modulation[J]. *New Journal of Physics*, 2011, 13: 063012.
- [8] Xiang Dao, Ding Yuantao, Raubenheimer T, et al. Mode-locked multichromatic X rays in a seeded free-electron laser for single-shot X-ray spectroscopy[J]. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 2012, 15: 050707.

- [9] Feng Chao, Chen Jianhui, Zhao Zhentang. Generating stable attosecond X-ray pulse trains with a mode-locked seeded free-electron laser[J]. [Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams](#), 2012, 15: 080703.
- [10] Henderson J R, McNeil B W J. Echo enabled harmonic generation free electron laser in a mode-locked configuration[J]. [Europhysics Letters](#), 2012, 100: 64001.
- [11] Dunning D J, McNeil B W J, Thompson N R. Few-cycle pulse generation in an X-ray free-electron laser[J]. [Physical Review Letters](#), 2013, 110: 104801.
- [12] Maraju P K, Grazioli C, Di Fraia M, et al. Attosecond pulse shaping using a seeded free-electron laser[J]. [Nature](#), 2020, 578(7795): 386-391.
- [13] Maraju P K, Grazioli C, Di Fraia M, et al. Complex attosecond waveform synthesis at FEL FERMI[J]. [Applied Sciences](#), 2021, 11: 9791.
- [14] 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(1/3): 243-248.