

激光尾场电子加速器驱动的全光学 FEL 物理模拟研究

王光磊^{1,2} 姚海凤¹ 张彤¹ 王兴涛¹ 王文涛³ 王成³ 曾志男³ 刘建胜³ 王东¹

(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 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 对中国科学院上海光学精密机械研究所(SIOM)即将开展的基于激光尾场加速(LWFA)电子束的自由电子激光(FEL)实验(SIOM-FEL)进行了数值模拟研究,提出利用直接外种子激光驱动的方案来获得 FEL 辐射。理论和仿真结果表明,采用直接外种子激光驱动模式,在束流能散为 1%,发射度为 0.3 mm·mrad 的情况下,提高峰值电流强度到 10 kA 可以得到接近 200 倍增益的 FEL 辐射,而利用具有横向梯度的波荡器也可以在较低的束流强度条件下获得较高的辐射增益。

关键词 激光光学; 自由电子激光; 直接外种子激光驱动; 高次谐波产生; 激光尾场加速器; 横向梯度波荡器

中图分类号 TL53 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.0902005

Simulation Study of All Optical-FEL Based on the Laser Wakefield Accelerator

Wang Guanglei^{1,2} Yao Haifeng¹ Zhang Tong¹ Wang Xingtao¹ Wang Wentao³
Wang Cheng³ Zeng Zhinan³ Liu Jiansheng³ Wang Dong¹

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 Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Simulations of free electron laser (FEL) experiments based on the laser-wakefield accelerator, which will be conducted at Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics (SIOM), Chinese Academy of Sciences, are performed. Direct-seeding with high harmonic generation (HHG) is proposed as the scheme for free-electron laser experiments at SIOM (SIOM-FEL). The theoretical and simulation results show that the FEL signal will be amplified about 200 times compared with the initial high harmonic generation when the electron beam energy spread is 1%, the emittance is 0.3 mm·mrad and the peak current is about 10 kA. What's more, the application of the transverse gradient undulator (TGU) can further improve the FEL performance even with a relatively low peak current.

Key words laser optics; free electron laser; direct-seeding; high harmonic generation; laser-wakefield accelerator; transverse gradient undulator

OCIS codes 220.4830; 320.7090; 340.7215

1 引言

近几年,随着自由电子激光装置和技术的发展,高亮度,短波长的自由电子激光(FEL)辐射在化学,

生物,环境等领域越来越广泛地被应用。FEL 是通过电子束在波荡器磁场中的周期性运动来产生的,当辐射波长符合共振条件时,电子束与磁场的相互

收稿日期: 2014-02-19; **收到修改稿日期:** 2014-03-26

作者简介: 王光磊(1986—),男,博士研究生,主要从事自由电子激光相关模拟和实验等方面的研究。

E-mail: wangguanglei@sinap.ac.cn

导师简介: 王东(1962—),男,研究员,博士生导师,主要从事加速器物理、新一代同步辐射光源和短波长高增益自由电子激光等方面的研究。E-mail: wangdong@sinap.ac.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

作用就会对电子束引入一个能量调制,并且因为波荡器本身的色散进一步转化为密度调制,即形成所谓的微聚束,并产生相干的 FEL 辐射。传统的 FEL 装置大都采用自放大自发辐射(SASE)机制,例如美国直线加速器相干光源(LCLS),德国的 FLASH 等^[1-2]。SASE 辐射来自电子束在波荡器中的自发辐射,由于电子束散粒噪声的存在,SASE-FEL 的时间相干性比较差,这就限制了 FEL 在诸如多分子单次成像和进行纳米结构成像等领域的应用^[3]。直接外种子激光驱动 FEL 是采用高次谐波产生(HHG)激光作为外部种子来与电子束相互作用产生相干辐射的一种 FEL 放大方案,2009 年在 SCSS 已经成功实现出光^[4],DESY 也进行了波长为 38 nm 的直接外种子激光驱动 FEL 实验^[5]。直接外种子激光驱动 FEL 所具有的优点是装置结构相对简单,并且外种子型 FEL 完全继承种子激光的优秀特性,最终输出的 FEL 辐射同时具有时间和空间上的相干性,另外直接外种子激光驱动 FEL 放大过程又能很好的弥补 HHG 脉冲能量偏低的缺点。

FEL 装置需要高品质的电子束作为发光介质,根据共振方程,短波长 FEL 装置需要能量较高的电子束。对于采用传统射频加速技术的加速器来说,受限于射频腔中如场致发射等导致的真空击穿,其加速电场被限制在 100 MV/m 之内,由此造成高能加速器庞大的体积及高昂的造价,例如 LCLS 采用的用于产生 14 GeV 电子束的直线加速器长度就长达 1 km,电子能量更高的欧洲 XFEL 的加速器长度超过 1.7 km^[6-7]。这些庞大的直线加速器以及附加结构所产生的高额费用不利于 FEL 的小型化,阻碍 FEL 的大规模推广。

随着啁啾脉冲放大技术的不断发展,出现了超短超强激光脉冲,这为利用激光脉冲共振激发等离子体尾波,进而加速电子提供了新的途径^[8]。新型的激光尾场加速(LWFA)技术可显著增加加速电场,加速梯度可达到几百吉伏特每米甚至更高^[9],只需要数米的加速距离就能达到非常高的束流能量,从而可以大大缩小加速器的尺寸和降低整体成本。同时 LWFA 能产生长度短于等离子体波长的电子束团,可以使束流强度提高到达十万安培甚至更高的量级,并且 LWFA 电子束的发射度较低^[10]。目前,国际和国内 LWFA 发展都十分迅速,通过新技术的引进以及工艺的提高,在 1 GeV 量级实现 0.1%能散的电子束输出已经成为可能^[11],LWFA 所有这些情况都为实现紧凑型的桌面全光学 FEL

装置提供了有利条件。本文对中国科学院上海光学精密机械研究所(SIOM)即将开展的基于激光尾场加速电子束的自由电子激光实验(SIOM-FEL)装置参数进行了系统的优化,对输入电子束参数进行了详细的扫描,为 SIOM-FEL 放大实验提供了模拟依据。

2 SIOM 激光等离子体加速实验

中国科学院上海光学精密机械研究所的强场激光物理国家重点实验室在 LWFA 研究上取得了重要的突破^[12],在 SIOM 自行研制的飞秒拍瓦级超强超短钛宝石激光实验装置上,实现了电离注入的全光驱动的双尾波场级联电子加速方案。实验获得了能量近 1 GeV 的准单能电子束和 187 GV/m 的超高加速梯度。基于以上研究成果,提出了基于 LWFA 技术的全光学 FEL 实验计划。实验拟采用 LWFA 产生的能量为 500 MeV 的电子束,保持电子束能散在 1%~3% 范围,发射度维持在 0.1~1 mm·mrad 之间。

3 直接外种子激光驱动 FEL 实验方案

世界上几个 FEL 实验室已经或正在准备直接外种子激光驱动 FEL 的相关实验。与传统的 SASE-FEL 相比,直接外种子激光驱动 FEL 因为作为种子激光的 HHG 的引入,可以在更短的波荡器长度内实现 FEL 饱和。相比其他产生相干 FEL 辐射的机制如回声型谐波产生(EHGH)和高增益谐波产生(HGHG)^[13-14],由于不存在谐波 N 次转换,所以避免了 FEL 中电子束和种子激光的噪声 N^2 放大的问题^[15],保证了输出光的质量,并且直接外种子激光驱动 FEL 是对种子激光进行放大,所以由于电子束能量调制以及电子束与种子激光之间的时间抖动等因素引起的光谱中心波长抖动问题并不存在。SIOM 在 HHG 方面有着丰富的实验经验,可以在 30 nm 波长附近获得脉冲宽度为 5 fs,功率为 1 MW 的稳定 HHG 辐射。综合考虑,在该波段选用直接外种子激光驱动 FEL 机制来进行 LWFA-FEL 的放大。SIOM 的直接外种子激光驱动 FEL 装置结构示意图如图 1 所示,该装置主要包括 LWFA 和诊断系统,FEL 放大系统,HHG 种子激光和注入系统以及能谱测量系统等几部分。注入系统主要由 4 块二极磁铁构成的 chicane 组成,可以使电子束横向偏移,同时经过一系列反射镜和 chicane 配合使 HHG 种子激光能够更方便的注入。随后的

截面靶保证种子激光与电子束在空间上的重合,然后通过飞秒定时系统就可以将 HHG 种子激光与电子束同步注入到波荡器内进行 FEL 放大。波荡器由单位长度为 2 cm 的波荡器磁铁周期性排列组成,波荡器总长度为 3 m。HHG 种子激光系统通过把

钛宝石激光器产生的高强度驱动激光引入稀有气体(例如 He,Ne)靶室,产生波长为 30 nm 的 HHG 辐射,如果实验条件需要,通过升级,更高级次的 HHG 辐射也可以产生并满足实验需求。

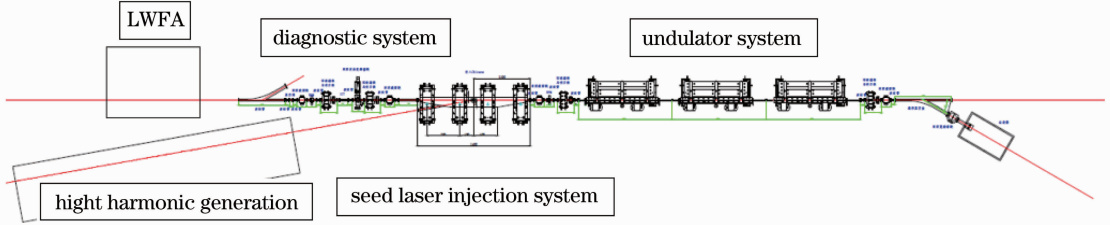


图 1 SIOM 的直接外种子激光驱动 FEL 装置示意图

Fig. 1 Schematic of the direct-seeding FEL configuration at SIOM

4 数值模拟

FEL 的共振波长可以表示为

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2}\right), \quad (1)$$

对于一维(1D)单能电子束,FEL 的输出功率 P 和增益长度 L_{G0} 可以分别用下列公式来估算:

$$P \propto \exp\left(\frac{z}{L_{G0}}\right), \quad (2)$$

$$L_{G0} = \frac{\lambda_u}{4\sqrt{3}\pi\rho}, \quad (3)$$

皮尔斯参数 ρ 可表示为^[16]

$$\rho \approx \frac{1}{4} \left[\frac{1}{2\pi^2} \frac{I}{I_A} \frac{\lambda_u^2}{\epsilon_x \beta_x} \left(\frac{K}{\gamma}\right)^2 \right]^{1/3}, \quad (4)$$

式中 I 表示电子束的峰值束流强度, λ_u 为波荡器周期长度, $K = 0.934 B(T)\lambda_u(\text{cm})$, B 为电磁感应强度,Alfven 电流 $I_A = 17 \text{ kA}$, ϵ_x 为发射度, β_x 为 beta 函数, γ 为电子能量^[17]。(4)式表示理想条件下电子束和 FEL 辐射之间的能量转化效率。此外,Xie^[18] 给出了计算三维(3D)情况下 FEL 增益长度的经验公式

$$L_G = L_{G0}(1 + \Delta), \quad (5)$$

式中 Δ 是与电子束能散相关的参数。这些理论公式是估算 FEL 性能的重要依据,通过这些公式可以得到束流强度 I ,发射度 ϵ_x ,能散 σ_γ 等束流参数对于 FEL 辐射性能十分重要,因此本文对这三个参数进行了重点的分析。

由于 FEL 放大过程中 HHG 种子激光与电子束之间存在滑移效应,电子束自身的散粒噪声和加速过程带来的各种电子束特性,空间电荷力及电子束自身发射度等原因导致的束团横向和纵向尺寸的变化,波荡器自身存在的各种微小误差以及实验过程产生的

实际问题的影响,所以采用 FEL 领域通用的模拟软件 Genesis 1.3^[19] 以及表 1 中的数据(其中 RMS 指均方根值,FWHM 为半峰全宽值),综合考虑了以上几个实际问题,对 SIOM-FEL 的实验参数进行了 3D 时间模拟,进一步给出了与实际情况更相符的计算结果。根据上述的理论分析,在模拟中对束流强度,能散,发射度等主要参数进行了系统扫描,为 SIOM-LWFA 的实验优化提供重要参考。

表 1 SIOM-FEL 主要参数

Table 1 Main parameters of SIOM-FEL

Electron beam	Value
Energy /MeV	500
Normalized emittance /(mm · mrad)	0.1~1
Peak current /kA	2~20
Energy spread/ %	0.5~3
Bunch length (RMS) /fs	500
HHG seed laser	Value
Wavelength/ nm	30
Peak power /MW	1
Pulse length (FWHM) /fs	5
Rayleigh length /m	3
Undulator	Value
Undulator period length /cm	2

首先分析能散对 SIOM-LWFA-FEL 输出的影响,根据 FEL 共振关系(1)式,大的能散会严重破坏 FEL 的共振条件。由(5)式可以计算出能散在 3% 及 2% 的时候,FEL 的 3D 增益长度分别为 4.04 m 和 1.28 m(电流强度为 20 kA),较大的增益长度导致了在 SIOM-LWFA 3 m 长的波荡器中仅能实现有限的能量交换。图 2 给出了能散分别为 3% 和 2% 时不同束流强度下最大功率沿波荡器坐标 Z 的

变化。从模拟结果可以看出,即使保持了非常低的发射度 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, FEL 放大效率仍然很低,即

使在电流强度为 20 kA 的苛刻条件下,也仅实现了 50 倍 FEL 增益(能散 2%)。

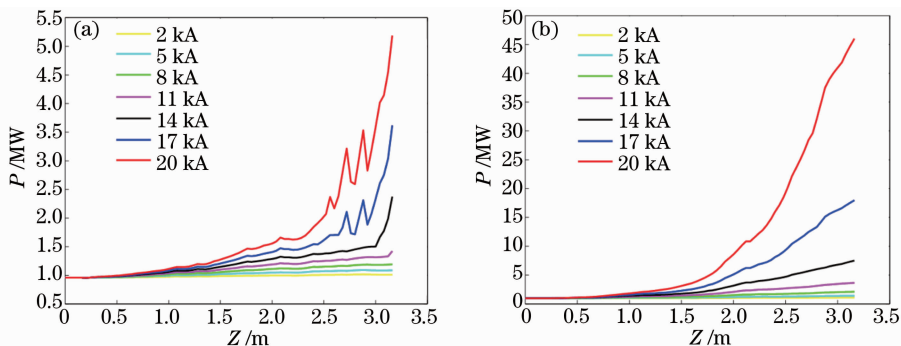


图 2 发射度为 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 时不同束流强度下最大脉冲功率沿波荡器 Z 轴的变化。(a) 能散为 3% ; (b) 能散为 2%
 Fig. 2 Maximum FEL powers along the undulator axis Z with different peak currents when the emittance is $0.1 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$. (a) Energy spread is 3% ; (b) energy spread is 2%

如果实验中能够进一步优化实验条件及参数,降低能散至 1% ,并保持其他参数不变,则 FEL 的增益长度会减小到 0.24 m (电流强度 20 kA)。但在实际的 SIOM-LWFA 实验中,控制能散会引起发射度的增加,所以本文对发射度为 0.5 、 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 两种情况进行了模拟。图 3 给出了

发射度分别为 0.5 、 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 时不同束流强度下最大脉冲功率沿波荡器坐标 Z 的变化。随能散的减小,降低发射度至 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 并且提高束流强度至 10 kA 即可保证 FEL 至少三个数量级的放大,但目前此套参数要求对 SIOM 的实际实验尚存在一定困难。

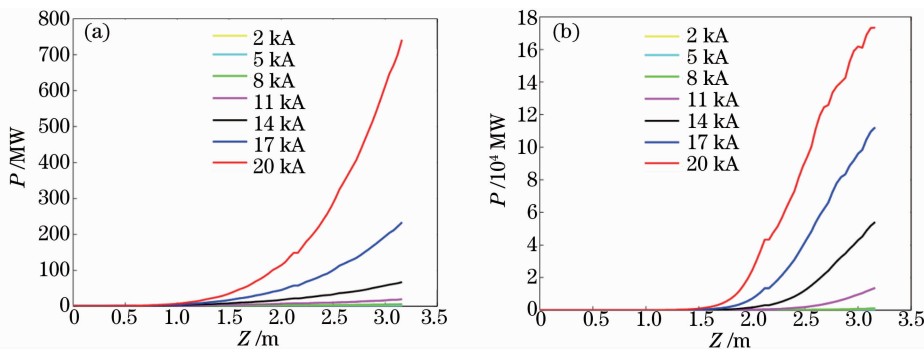


图 3 能散为 1% 时不同束流强度下最大脉冲功率沿波荡器 Z 轴的变化。
 (a) 发射度为 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$; (b) 发射度 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$

Fig. 3 Maximum FEL powers along the undulator axis Z with different peak currents when the energy spread is 1% .
 (a) Emittance is $0.5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$; (b) emittance is $0.1 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$

从上面的模拟结果可以得到,能散是决定直接外种子激光驱动 FEL 放大倍率最为关键的参数。但是,在 SIOM-LWFA 的实验中,相比发射度与电流强度,能散却是最难以提升的参数,所以,结合模拟结果与实验情况给出的优化优先级就是尽量地提高束流强度,同时维持或降低能散与发射度。从增益长度的计算公式(3)式可知,提高束流强度可以减少 FEL 增益长度,并且可以降低 FEL 对能散和发射度的要求(见图 2 和图 3)。如果能同时降低能散至 1% ,发射度到 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$,相比种子激光,直接外种子激光驱动 FEL 可以获得高达 4~5 个数量级的 FEL 放大。如果能散在 SIOM-LWFA 实验中

难以降低,只能维持在 $2\% \sim 3\%$ 附近,那么所谓的横向梯度波荡器(TGU)^[20-21]也可以用来减小能散对 FEL 放大过程的影响。TGU 中的磁极对应波荡器中心平面有一个特定角度倾斜,因此波荡器的磁场带有恒定的横向梯度。实验中,较高能量的电子通过色散段色散到较强的磁场范围内,从而保证了不同能量的电子同时满足 FEL 的共振条件。针对 SIOM 较为宽松的实验条件(能散 2% ,发射度 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$,电流强度 5 kA),采用了 TGU 对 SIOM-FEL 进行了模拟计算。模拟结果如图 4 所示,可见随着 TGU 的加入,相比常规波荡器,最终 FEL 辐射功率有约为 50 倍的增长,极大地降低了

对电子束参数的要求。但是实验中 TGU 会极大增加整个波荡器系统的复杂程度,控制束流会相对困难。

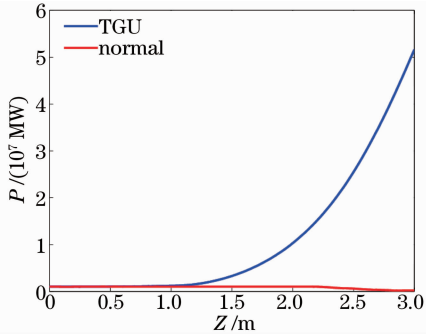


图 4 相同束流参数(能散 2%,发射度 0.5 mm · mrad,电流强度 5 kA)下 TGU 与常规模式最大功率沿波荡器 Z 轴的变化

Fig. 4 Comparison of the peak powers between the TGU mode and the normal undulator with the same beam parameters (energy spread is 2%, emittance is 0.5 mm·mrad and peak current is 5 kA)

最后,选取了一组接近 SIOM 实验结果的参数进行了模拟(能散 1%,发射度 0.3 mm · mrad,电流强度 10 kA),图 5 模拟结果对比显示了 HHG 种子激光和在相同波荡器长度内 SASE 辐射以及直接外种子激光驱动 FEL 的光谱,及沿着波荡器坐标 Z 的最大脉冲功率。从图 5(a)模拟结果可以得到,直接外种子激光驱动 FEL 光谱的相对带宽(FWHM)为 $\Delta\lambda/\lambda=0.9223\%$,明显优于 SASE 光谱,而且相比 HHG,直接外种子激光驱动 FEL 的脉冲峰值功率具有约 200 倍的放大[见图 5(b),S 为束团长度]。由于电子束与 HHG 之间存在额外能量交换,电子束平均能量有所降低,所以直接外种子激光驱动 FEL 的光谱有轻微的红移。图 6 为 HHG, SASE 和直接外种子激光驱动 FEL 的横向模式图样,相比 SASE,由于 HHG 种子激光的加入,直接外种子激光驱动 FEL 的输出辐射横向模式优秀,保证了输出光谱的横向相干性。

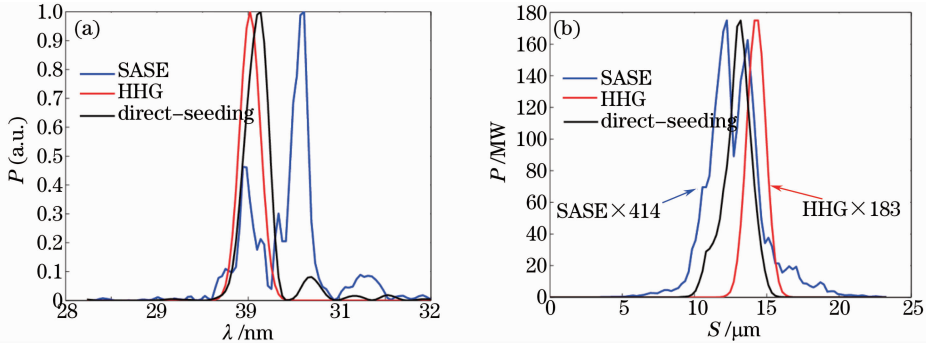


图 5 能散为 1%,发射度为 0.1 mm · mrad,电流强度为 10 kA 时,HHG,SASE 以及直接外种子激光驱动 FEL 的对比。

(a) 波荡器出口处的光谱; (b) 波荡器出口处的辐射脉冲

Fig. 5 Comparison of the FEL powers between HHG, SASE and direct-seeding with energy spread of 1%, emittance of 0.1 mm · mrad and 10 kA peak current. (a) Spectra at the exit of the undulator; (b) output pulses at the exit of the undulator

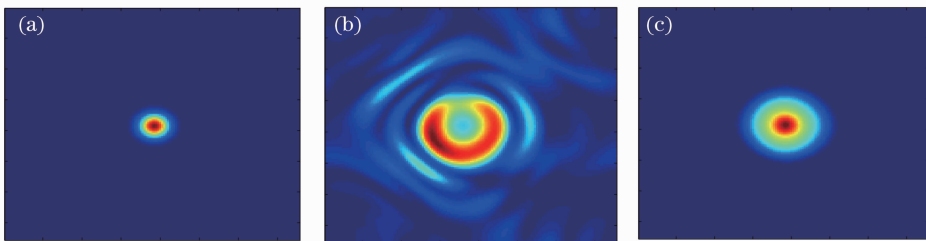


图 6 能散为 1%,发射度为 0.1 mm · mrad,电流强度为 10 kA 时,(a) HHG, (b) SASE 以及 (c)直接外种子激光驱动 FEL 横向模式对比

Fig. 6 Comparison of the transverse modes between (a) HHG, (b) SASE and (c) direct-seeding with energy spread of 1%, emittance of 0.1 mm · mrad and 10 kA peak current

5 结 论

对 SIOM-FEL 的模拟结果表明,能散是决定最终 FEL 性能的关键参数,但是由于 SIOM 实验上在

电子束能散控制方面的限制,提高电流强度将是提升 FEL 品质的一个途径。参考 SIOM 已有的实验参数,将电子束能散控制在 1%以内,发射度降低到

0.3 mm · mrad, 提高峰值电流强度至 10 kA 则可以得到较高的 FEL 增益。TGU 的存在可以大大减少 FEL 对电子束能散的要求, 进一步提升 LWFA-FEL 的辐射质量。使用 HHG 作为种子来驱动 FEL 可以将全相干 FEL 辐射的波长推向软 X 射线甚至更短的波长范围, 结合 TGU, HHG 及新的 LWFA 技术可以将所谓的桌面型 X 射线 FEL 推向了一个新的台阶。此外, 由于电子束束团长度短, 电荷量高, 较强空间电荷力的存在, 使得波荡器中运动电子的横向展开对最终 FEL 辐射会有一定影响。诸如经过 chicane 时发生的相干同步辐射等效应也需要进一步的模拟研究。

参 考 文 献

- 1 P Emma, R Akre, J Arthur, *et al.*. First lasing and operation of an ångstrom-wavelength free-electron laser [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(9): 641–647.
- 2 K Tiedtke, A Azima, N Bargon, *et al.*. The soft x-ray free-electron laser FLASH at DESY: beamlines, diagnostics and end-stations[J]. *New J Phys*, 2009, 11(2): 023029.
- 3 C J Bocchetta. FERMI@Elettra-Conceptual Design Report[M]. Trieste: Simcrotrone, 2007.
- 4 G Lambert, T Hara, T Tanikawa, *et al.*. The SCSS test accelerator free-electron laser seeded by harmonics produced in gas[C]. *UVX-Colloquium Surles Sources Coherents at Incoherents UV*, 2009. 85–91.
- 5 J Bödewadt, A Azima, F Curbis, *et al.*. sFLASH-First results of direct seeding at FLASH[J]. *Proceedings of FEL 2010*, 2010.
- 6 Nuhn H O. IINAC Coherent Light Source (LCLS) Conceptual Design Report [R]. Stanford: Stanford Linear Accelerator Center, 2002.
- 7 Altarelli M, Brinkmann R, Chergui M. The European X-ray Free-Electron Laser: Technical Design Report[R]. DESY XFEL Project Group, 2007.
- 8 Nasr A M Hafz, Tae Moon Jeong, I W Choi, *et al.*. Stable generation of GeV-class electron beams from self-guided laser-plasma channels[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(9): 571–577.
- 9 Kazuhisa Nakajim. Compact X-ray sources: towards a table-top free-electron laser[J]. *Nature Physics*, 2008, 4(2): 92–93.
- 10 S M Hooker. Developments in laser-driven plasma accelerators [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(10): 775–782.
- 11 N Andreev, S Kuznetsov. Electron bunch compression in laser wakefield acceleration[C]. *Proceeding of the Workshop on 2nd Generation Laser and Plasma Accelerators*, 2001. 24–29.
- 12 J S Liu, C Q Xia, W T Wang, *et al.*. All-optical cascaded laser wakefield accelerator using ionization-induced injection [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(3): 035001.
- 13 Z T Zhao, D Wang, J H Chen, *et al.*. First lasing of an echo-enabled harmonic generation free-electron laser [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(6): 360–363.
- 14 L H Yu, M Babzien, I Ben-zvi, *et al.*. High-gain harmonic-generation free-electron laser science [J]. *Science*, 2000, 289(5481): 932–934.
- 15 E L Saldin, E A Schneidmiller, M V Yurkov. Study of a noise degradation of amplification process in a multistage HGHG FEL [J]. *Optics Communications*, 2002, 202(1): 169–187.
- 16 P Schmüser, M Dohlus, J Rossbach. Ultraviolet and Soft X-Ray Free Electron Lasers[M]. Springer Tracts in Modern Physics, 2009. 229.
- 17 Kwang-Je Kim, Z Huang, R Lindberg. Introduction to the Physics of Free Electron Lasers[R]. Palo Alto: Leland Stanford Jounior University, 2010.
- 18 Xie M. Exact and variational solutions of 3D eigenmodes in high gain FELs [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 2000, 445(1): 59–66.
- 19 S Reiche. GENESIS 1. 3: a fully 3D time-dependent FEL simulation code[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 1999, 429(1): 243–248.
- 20 T Smith, J M J Madey, L R Elias, *et al.*. Reducing the sensitivity of a free electron laser to electron energy[J]. *Journal of Applied Physics*, 1979, 50(7): 4580–4583.
- 21 Zhirong Huang, Ying Y, Schroeder C B, *et al.*. Compact X-ray free-electron laser from a laser-plasma accelerator using a transverse-gradient undulator [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109(20): 204801.

栏目编辑: 史 敏