



·自由电子激光和新型光源·

基于激光等离子体加速的自由电子激光研究新进展

姜 海^{1,2}, 王文涛², 冯 珂², 顾铮先¹, 李儒新^{2,3}

(1. 上海理工大学 理学院, 上海 200093; 2. 中国科学院 上海光学精密机械研究所, 强场激光物理国家重点实验室, 中国科学院 超强激光科学卓越中心, 上海 201800; 3. 上海科技大学 物质科学与技术学院, 上海 200031)

摘 要: 激光等离子体加速器能够在 cm 尺度内产生 GeV 量级的高品质电子束, 为研制台式化自由电子激光提供驱动源。但是受限于激光等离子体加速中的难点和现有技术发展, 电子束的品质难以达到自由电子激光的需求, 尤其在稳定性、发散角和能散等方面, 阻碍了台式化自由电子激光的研制。介绍了基于激光等离子体加速器的自由电子激光的最新进展, 整理了目前高增益自由电子激光实验过程中存在的主要挑战和对应的解决方案与实验进展, 并展望未来的发展方向。最近的研究结果证明, 通过控制和优化激光等离子体加速器的注入和加速过程产生的高品质电子束可以在指数增益区域实现自发辐射放大, 产生高增益的辐射, 这也推动基于激光等离子体加速器的自由电子激光研究进入了一个新的阶段。

关键词: 激光等离子体加速器; 高品质电子束; 自由电子激光; 波荡器辐射; 新型光源

中图分类号: O53

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220090

Research progress of free electron laser based on laser plasma acceleration

Jiang Hai^{1,2}, Wang Wentao², Feng Ke², Gu Zhengxian¹, Li Ruxin^{2,3}

(1. College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. State Key Laboratory of High Field Laser Physics and CAS Center for Excellence in Ultra-intense Laser Science, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

3. School of Physics Science and Technology, Shanghai Tech University, Shanghai 200031, China)

Abstract: Laser plasma accelerator can accelerate electron beams to GeV level within a few centimeters, which provides a driving source for the development of table-top free electron laser. However, due to the difficulties in laser plasma acceleration and the development of existing technology, the quality of electron beam is not high enough to realize free electron laser, especially in the aspects of stability, divergence and energy spread of electron beam, which present substantial obstacles to the development of compact free electron laser. In this paper, the latest research progress of free electron laser based on laser plasma accelerator is introduced, the main challenges in the experiment for high gain free electron laser are analyzed, then corresponding solutions and experimental progress are summarized, and the future development is prospected. A recent research shows that the high-quality electron beam produced by controlling and optimizing the injection and acceleration of laser plasma accelerator can achieve spontaneous emission amplification and produce high gain radiation in the exponential gain regime, which promotes the research for free electron laser based on laser plasma accelerator to a new stage.

Key words: laser plasma accelerator, high-quality electron beams, free electron laser, undulator radiation, novel light sources

随着加速器技术的发展, 基于加速器的先进光源如同步辐射和自由电子激光 (free electron laser, FEL) 在物理、化学、生物、医学和材料等领域发挥了重要的作用。作为第四代光源, 自由电子激光凭借其高亮度、短脉宽和全相干的优势成为了探索科学前沿的强大工具^[1]。FEL 装置通常依赖于射频直线加速器, 其庞大的规模和高昂的成

* 收稿日期: 2022-03-30; 修订日期: 2022-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11991072, 11875065, 12105353); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDB16); 中国科学技术部国家重点实验室计划和中国科学院青年创新促进会项目 (Y2019S2, 2022242)

联系方式: 姜 海, jianghai@siom.ac.cn。

通信作者: 王文涛, wwt1980@siom.ac.cn;

李儒新, ruxinli@siom.ac.cn。

本限制了 FEL 装置的传播和使用,目前只有少数几个国家和地区拥有这样的装置。激光等离子体加速器^[2](laser plasma accelerator, LPA)通过强激光与等离子体相互作用激发出类似空泡结构的等离子体波,等离子体中的电子可以被空泡捕获并加速。在 LPA 中,等离子体不受击穿电压的限制,加速梯度可达 100 GV/m^[3],比射频加速器高 3 个数量级。目前, LPA 可实现在 cm 范围内将电子加速到 GeV 量级^[4-5],使用 LPA 作为驱动源有望实现小型化 FEL 装置的研制,极大地减小 FEL 装置的规模 and 成本,促进自由电子激光装置的普及和使用。此外, LPA 产生的电子束具有高流强、短脉宽和低发射度的特点,这也为 FEL 带来了一些新的特性,如超高亮度和超高时间分辨率。

2008 年, Nakajima 在 LPA 的基础上提出了台式化自由电子激光的概念^[6]。随着激光尾场加速技术的发展,越来越多的研究团队认识到了台式化自由电子激光的潜力和价值^[7],如图 1 所示,很多国家和地区的研究机构都已经建造了实验研究平台并开展了相关的研究课题,如法国国家科学研究中心应用光学实验室(LOA)、德国的电子同步加速器研究所(DESY)和汉堡大学合作的激光与粒子束驱动的等离子体加速器实验室(LAOLA)、美国劳伦斯伯克利国家实验室(LBNL)和中国科学院上海光学精密机械研究所(SIOM)。此外,欧洲的联合研究项目 EuPRAXIA^[8]正在建造基于等离子体加速器的基础设施,旨在推动台式化 FEL 的应用。目前,国际上还未实现真正意义上的台式化自由电子激光,基于激光等离子体加速器的自由电子激光还面临着诸多挑战。

本文总结了基于激光等离子体加速器的台式化自由电子激光目前面临的主要挑战,从高品质电子束的产生、束流传输以及能散补偿方面出发介绍了国际上提出的一些解决方案和当前实验进展,最后介绍了基于激光等离子体加速器的自由电子激光在实验研究方面的取得的最新进展。

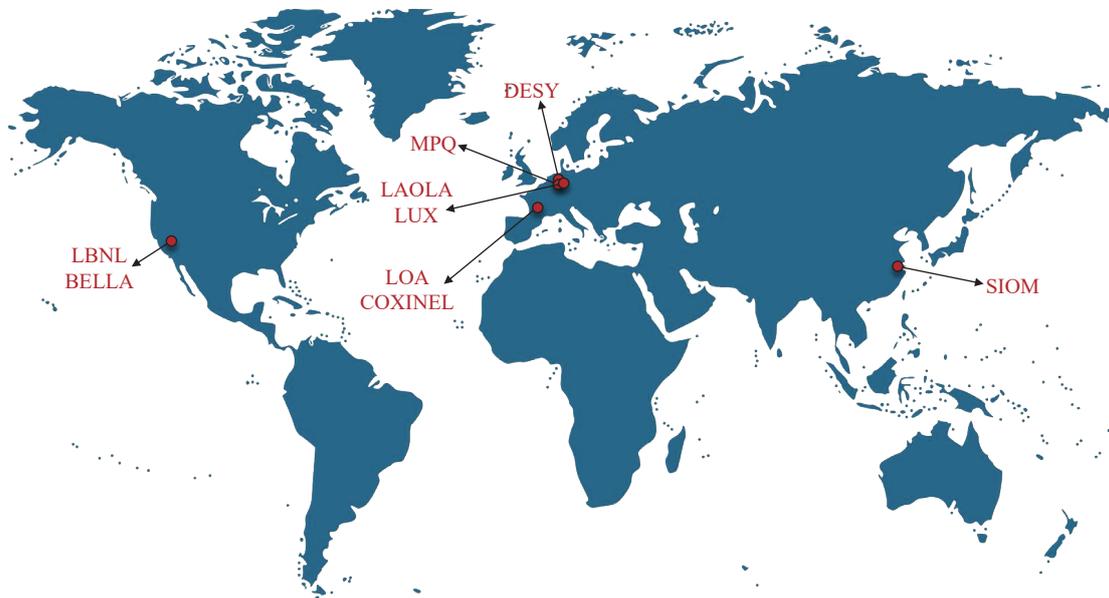


Fig.1 World map of free electron lasers driven by laser plasma accelerator

图 1 激光等离子体加速器驱动的自由电子激光装置国际分布图

1 LPA-FEL 面临的挑战

在高增益 FEL 理论中, FEL 的主要特征由 Pierce 参量 ρ ^[9] 决定。 $\rho = \left(\frac{1}{16} \frac{I_0}{I_A} \frac{K_0^2 [JJ]^2}{\gamma_0^3 \sigma_r^3 K_u^2} \right)^{1/3}$, 其中 I_0 为电子束的电流, $I_A \approx 17$ kA 为阿尔文电流, γ_0 是相对论因子, σ_r 为电子束的横向尺寸, $K_u = \frac{2\pi}{\lambda_u}$, λ_u 为波荡器周期, K_0 是表征波荡器磁场强度的波荡器参数, $[JJ]$ 是平面波荡器的场耦合参数。

Pierce 参量 ρ 是由电子束的参数和波荡器的参数共同决定的,所以 FEL 非常依赖于电子束的特性和波荡器技术。高增益 FEL 要求电子束的能散小于 ρ , 根据现有 LPA 和波荡器技术, ρ 通常在 1×10^{-3} 左右,这就要求电子束的能散低于 0.1%。然而当前国际上基于 LPA 可获得的电子束能散通常为 1% 左右,不能满足高增益 FEL 的要求。LPA 产生的电子束具有较大的初始发散角,尽管电子束的初始尺寸较小,但是电子束在波荡器中的长距离传输会导致其横向尺寸 σ_r 增大,阻碍 FEL 辐射的放大,这对电子束的束流传输提出了较大的挑战。此外,由于激光和等离子体的相互作用过程中存在许多非线性效应,激光和等离子体参数的微小变化都会对电子束的产生过程造成显著

的影响,导致电子束具有较大的抖动性,影响后续的束流传输和 FEL 辐射的稳定性。高增益 FEL 对电子束的品质和传输提出了很高的要求,目前基于 LPA 产生电子束还达不到这些要求,这也促使国内外的研究人员提出多种解决方案来实现台式化 FEL。

2 解决方案和实验进展

2.1 高品质电子束

电子束的品质决定了电子束是否能够用于驱动产生高增益的自由电子激光。自从 2004 年在实验上首次获得百 MeV 能量的准单能电子束之后^[10],研究人员相继提出了一系列新的注入机制和加速方案控制电子束的产生与品质优化^[11-13],电子束的品质得到了很大程度的提升。对于 FEL 来说,电子束的能散是一个非常重要的指标,因此压缩电子束的能散成为激光等离子体加速领域的研究重点之一。在 LPA 中,电子束的能散主要来源于电子的注入和加速过程。在注入过程中,不同时刻注入的电子加速的时长不同,如果电子长时间持续注入就会导致后注入的电子能量低于先注入的电子,进而导致电子束拥有较大的能散。在加速的过程中,由于等离子体尾场产生的电场是不均匀的,处于不同纵向位置的电子具有不同的加速梯度,加速出来的电子具有显著的能量啁啾,这是电子束能散难以压缩到千分之一的主要限制。

为减小电子束在注入和加速过程中产生的能散,目前理论上提出了一些控制注入方案和能量啁啾补偿方案,这些方案有望产生 10^{-3} 量级的能散。例如,在多脉冲电离注入方案中,通过选择接近束缚电子的电离阈值的注入脉冲强度控制电子的注入过程可获得超低发射度和超低能散的电子束,在模拟中获得的电子束切片能散在 0.1% 以下^[14]。在激波注入方案中,选择合适的密度下降沿条件,通过优化加速长度可获得 10^{-3} 量级能散^[15]。对于在加速过程中产生的具有能量啁啾的电子束,可以通过构造特殊的等离子体密度分布对电子束的能量啁啾进行补偿。例如在级联加速^[16-17]的基础上,通过设计三段等离子体区域分别用于电子的注入、压缩和加速,利用速度聚束效应在电子加速的过程中对电子的能量啁啾进行多次补偿,在模拟中可以获得 0.2% 能散的电子束^[18]。通过在线性尾场中构造周期性的等离子体密度分布,可以使加速场形成周期性的正负斜率交替的加速场,能够抑制电子在加速过程中能量啁啾的产生^[19]。除了构造特殊的等离子体密度之外,在电子加速的过程中使用外部注入的第二团电子束产生的 beamloading 场对带啁啾的目标电子束进行去啁啾的方案也可以获得 0.1% 左右的能散^[20]。

除了能散外,电子束的发射度也是激光等离子体加速器优化的重点。发射度是决定电子束亮度的重要参数,对 FEL 的增益过程同样非常的重要。电子束在注入时刻基本决定了其发射度的大小,发射度主要来源于激光的横向有质动力和空泡尾部的散焦场。因此可以通过减小激光横向有质动力或者控制电子注入时的横向速度来降低电子束的发射度。在对撞电离注入^[21]中,用来触发电子电离的激光束的强度非常小,激光的横向有质动力也比较小,因此适合用来产生发射度较小的电子束。此外,在激波注入中,通过控制密度下降沿,保持电子束在横向速度较小的时刻注入也可以获得超低发射度的电子束^[15]。

虽然在理论和模拟中已经可以产生 0.1% 以下能散的电子束,但是这些方案凭目前的实验条件和技术通常难以实现。在已报道的实验研究成果中,中国科学院上海光学精密机械研究所报道了由 LPA 产生的高亮度、低能散、小发散角的电子束。2016 年,SIOM 研究人员利用双级气体喷嘴结构构造了特定的密度梯度下降沿结构^[22],实验中构造的气体密度突起部分可以控制电子从第二空泡加速并注入到第一空泡中继续加速,形成空泡间的级联加速结构。此外,通过调节等离子体的密度可以控制电子加速过程中加速场的斜率反转,补偿电子束的能量啁啾降低电子束的能散。最终,在实验上获得了能量在 200~600 MeV 之间可调、能散 0.4%~1.2%、电量 10~80 pC 以及发散角 0.2 mrad 的高品质电子束,其六维相空间亮度可达 $6.5 \times 10^{15} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (0.1\%)^{-1}$,已经接近传统直线加速器产生的电子的亮度。2021 年,SIOM 研究人员构造了气体激波用来产生特定的气体密度分布^[23],通过调节激波的位置和等离子体密度分布来控制激光的自聚焦和散焦过程。在激光自聚焦的过程中控制电子的注入和加速,激光散焦的过程中加速场斜率与聚焦过程相反,从而对电子束进行去啁啾。最终在实验上获得了能量在 780~840 MeV、能散 0.24%~4.1%、电量 8.5~23.6 pC 以及发散角 0.1~0.4 mrad 的高品质电子束。

除了构造特定的密度分布产生高品质电子束之外,机器学习也被应用于激光尾场加速领域以优化电子束的品质^[24]。在激光等离子体加速过程中有大量的输入参数控制电子加速过程,包括激光强度、包络形状、光谱成分和等离子体参数等。这些参数相互耦合且存在很多非线性效应,在数值模拟和实验过程中难以主动寻找最佳匹配条件,机器学习很适合解决这类复杂系统的最优解问题。2021 年,德国汉堡大学和 DESY 的研究人员报道了在激光

等离子体加速实验中,用贝叶斯优化算法获得了 32 pC, 0.7% 能散的电子束^[25]。在该实验中,用电子束的能谱密度作为优化的目标函数 $f = \sqrt{Q\bar{E}}/\Delta E$, 其中 ΔE 为电子能量的绝对偏差, Q 为电荷量, \bar{E} 为电子束能量的中位数。优化从 10 个随机数据开始,通过优化激光强度、焦点位置和气体密度,每 6 发实验数据进行一次迭代,最终经过 45 min 共 50 次迭代之后将能散从最初的 3.7% 优化到 0.7%。

2.2 电子束的稳定长距离传输

电子束从产生到辐射的过程中需要在真空中传输相应的距离,在传输过程中维持电子束的品质对 FEL 来说是非常重要的。但是,在 LPA 中,电子束从等离子体过渡到真空中时由于横向聚焦力的消失会导致其在横向上迅速膨胀,产生大的发散角。如果不对电子束进行额外的操控,电子在波荡器中传输时会快速发散,影响 FEL 辐射的产生和放大。然而要抵消电子束从等离子体过渡到真空中时横向聚焦力消失对电子束的影响需要非常苛刻的要求^[26],现有的技术无法实现。

为了维持电子束在波荡器中传输时的品质,需要针对电子束的参数设计合适的束流传输线抑制电子束的发散。在束流传输线中,通常使用高梯度四极铁或等离子体透镜对电子束进行聚焦。在目前已经报道的束流传输线中,大多使用传统的永磁或电磁四极铁。通常,在靠近 LPA 的出口附近放置一组高强度四极铁来对电子束进行强聚焦,阻止电子束快速发散。在波荡器入口附近放置另一组四极铁用来维持电子束在波荡器中小尺寸传输。2018 年,SIOM 研究人员在实验上使用了四块电磁四极铁对电子束进行聚焦和准直^[27],测试了电子束通过长距离束流线的传输特征。该实验演示了通过匹配电子束的参数设计合适的束流传输线能够对 LPA 电子束的尺寸、发散角和指向性产生很好的聚焦和准直效果。

通常四极铁可以提供几十到几百 T/m 的磁场梯度,但是单个四极铁在横向上只能对单一方向的电子束聚焦,垂直方向上则表现为散焦,因此通常需要将相反强度的四极铁组合使用来对电子束产生径向聚焦的效果。这也导致四极铁需要更长的束流传输线,并且四极铁会对能散较大的电子束产生显著的色品效应,增加束流传输线的设计难度。等离子体透镜能够提供几千 T/m 的磁场梯度,可以在 cm 范围内聚焦电子束,是一种更为紧凑的电子聚焦器件。等离子体透镜可以由放电毛细管^[28]或由激光驱动^[29]产生,其由等离子体产生的横向聚焦力可以在直接对电子束聚焦,具有更好的聚焦效果,但是与四极铁相比较为复杂且灵活性和稳定性较差。目前美国劳伦斯伯克利国家实验室 BELLA 中心的 FEL 装置上采用了放电毛细管等离子体透镜的聚焦方案^[28,30],其磁场梯度高达 3500 T/m,可以在厘米范围内聚焦百 MeV 能量的 LPA 电子束。

由于激光等离子体加速是一个高度非线性的过程,驱动激光参数的变化会对电子束性能产生较大的抖动,因此驱动激光系统的稳定性对电子束能否稳定产生和长距离传输尤为重要,特别是激光的指向稳定性以及脉冲能量稳定性。FEL 对激光器稳定性的需求也促使了研究人员对激光系统持续的升级与优化。例如 2018 年,为了提升电子束的稳定性和可重复性,SIOM 研究人员对 200 TW, 1 Hz 的钛宝石激光器进行了全面升级^[31]。通过严格控制激光系统的工作环境和优化激光器的设计,提高了激光脉冲的指向稳定性,在 90 min 内测得的激光的指向稳定小于 1.5 μrad 。通过改进功率放大器,提高了激光的能量稳定性,在 90 min 内连续测量了 5400 发激光脉冲,其能量抖动低于 0.55%。使用升级后的激光系统在实验中测试了电子束的稳定性,在最佳实验条件下,连续 300 发电子束的平均能量为 667 MeV,能量抖动为 3.4%,可重复频率接近 100%。稳定的电子束在束流传输过程中能够保证四极铁更好地聚焦和准直,有利于电子束稳定长距离传输。

2.3 能散补偿等多种新方案

LPA 电子束的大能散是实现高增益 FEL 的最大的障碍,虽然在实验上已经可以获得 0.5% 左右能散的电子束,但这与 Pierce 参量 1×10^{-3} 左右的数值还有一定差距。目前国际上大多数 LPA 电子束的能散在 1% 左右,针对大能散的电子束,研究人员提出了几种能散补偿的新方案,包括电子束纵向展宽(decompression)^[32]和横向梯度波荡器(transverse gradient undulator, TGU)^[33]。

电子束的 decompression 是通过 chicane 结构实现的,如图 2 所示。Chicane 由四块二极铁组成,电子束在二极铁中传输时会发生偏转,不同的能量的电子偏转的角度不同。在经过 chicane 的四次偏转后,能量高的电子传输距离较短,能量低的电子传输距离较长,能量相同的电子传输的距离相同。在出口处, chicane 会根据电子能量的大小切片并重新排序,可以有效降低电子束的切片能散。在 FEL 辐射的过程中,较低的切片能散有利于辐射的放大过程。但是电子束的 decompression 会导致其峰值电流的降低,影响 FEL 的增益,因此在使用 decompression 方案时需要综合考虑电子束的切片能散和峰值电流对 FEL 的影响。目前国际上很多基于 LPA 的自由电子激光装置都使用

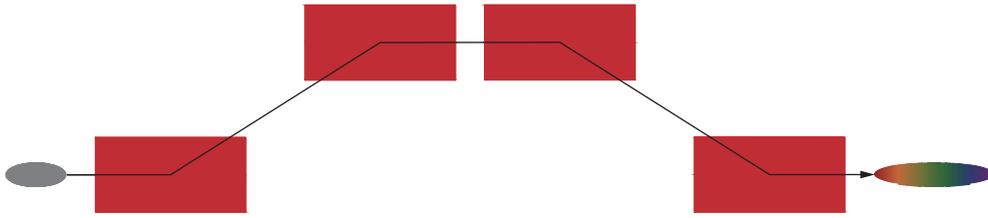


Fig. 2 Schematic diagram of chicane

图2 Chicane示意图

了 chicane 对电子束 decompression 来降低电子束的切片能散, 例如法国 LOA 的 COXINEL 装置^[34]、德国 LAOLA 的 LUX 装置^[35] 和美国 LBNL 的 BELLA 中心的 FEL 装置^[30] 等。

另一种用来补偿电子束能散的方案是 TGU, 如图 3 所示。TGU 可通过调整上下磁极之间的角度调整磁场的分布, 使其磁场在不同的横向位置具有不同的强度。根据 FEL 的共振条件 $\lambda_r = \frac{\lambda_u}{2\gamma} \left(1 + \frac{K_0^2}{2} \right)$, 不同能量的电子辐射出的光具有不同的波长 λ_r 。在 TGU 中, 波荡器参量 K_0 是横向位置的函数, 电子能量的相对论因子 γ 也是横向位置的函数。TGU 的基本思想是匹配电子束能量和波荡器参数从而使辐射光具有固定的辐射波长 λ_r , 由此提高 FEL 的品质和增益。通常电子束的相对论因子 γ 与横向位置的色散关系可由一块二极铁引入, 引入的色散值可通过 $D = \frac{2 + K_0^2}{\alpha K_0^2}$ 计算得到^[33]。通过选取合适的梯度和色散, TGU 可以最小化电子束能散对辐射波长的影响, 从而促进 FEL 辐射的放大。但是由于存在横向梯度, 所以电子束在水平方向上会产生滑移, 需要额外的磁场补偿电子束的水平滑移。此外 TGU 方案对电子束的稳定性要求较高, 尤其对电子束的能量抖动和指向抖动提出了很高的要求。目前, SIOM 和中国科学院上海应用物理研究所 (SINAP) 已经开展合作, 提出了初步的 TGU 实验方案^[36]。

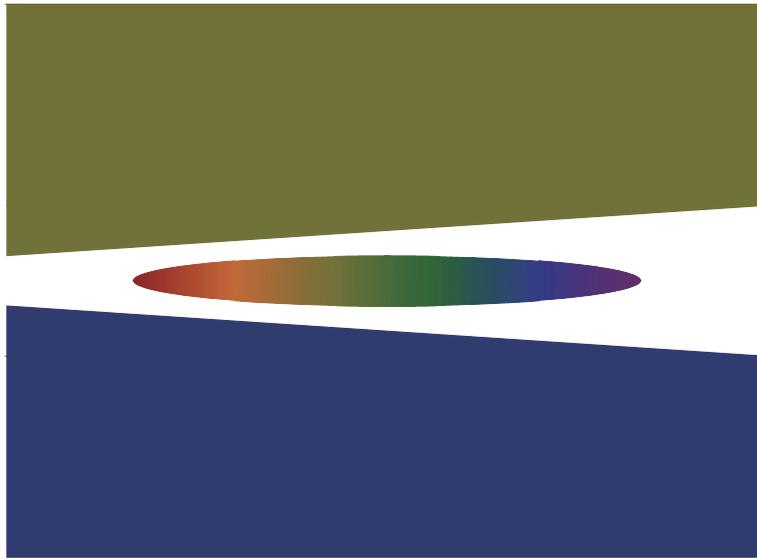


Fig.3 Schematic diagram of TGU

图3 横向梯度波荡器示意图

3 高增益 FEL 的实验进展

最早将 LPA 电子束用于波荡器辐射研究的是德国的研究小组, 2008 年, 通过将 LPA 产生电子束直接注入波荡器中, 在实验中探测到了波长为 740 nm 的红外波段的辐射光, 对应的电子能量为 64 MeV^[37]。基于 LPA 的台式化自由电子激光开始成为了激光等离子体加速器重要研究方向之一。2009 年, 德国马克斯普朗克量子光学实验室 (MPQ) 的研究小组使用一对四极铁对电子束进行准直和选能, 实验中探测到了基波波长为 18 nm 的软 X 射线波荡器辐射及其二次谐波^[38], 该实验中更高能量的电子和四极铁的使用使得辐射光子的波长更短且有效的提高了波荡器辐射的可重复性。2018 年, 法国 LOA 的研究人员针对 LPA 电子束大能散和大发散角的特点提出了色品传输方案并设计了一条专用的束流传输线^[39]。该传输线中使用了两组可变强度的四极铁用于处理电子束的发散角和准直, 使用 chicane 降低电子束的切片能散并且通过在 chicane 结构中插入宽度可调节的狭缝可选取所需的电子束能

量范围。实验上,基于 LPA 产生的能量为 176 MeV 左右的电子束,使用该传输线对电子束的纵向和横向相空间操纵,成功观测到波长为 200 nm 波荡器辐射。

上述实验中探测到的波荡器辐射都处于低增益的自发辐射阶段,辐射的品质和功率较低,难以达到 FEL 的要求。最近,得益于先前在高品质电子束产生和稳定长距离传输方面的探索和取得的成果,SIOM 的研究人员报道了使用紧凑型束流传输方案产生的高增益波荡器辐射,并通过实验证明了辐射的能量增益已经进入指数放大区域,成功实现了高增益 FEL 的原理证明^[40]。紧凑型束流传输方案示意图如图 4 所示,第一组高梯度四极铁放置在气体靶后方 8 cm 的位置用来对 LPA 产生的电子束进行强聚焦,后两块四极铁位于波荡器前保证电子束以最小的横向尺寸在波荡器中传播和辐射。波荡器使用的是 3 个长度为 1.5 m、波荡器强度为 1、周期长度为 2.5 cm 的平面波荡器。整条束流传输线的长度不到 10 m,简化了束流传输的复杂性。

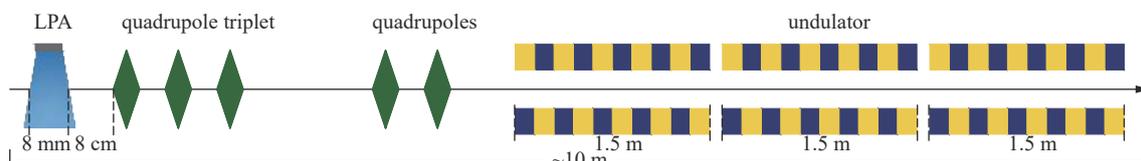


Fig. 4 Schematic diagram of compact beamline

图 4 紧凑型束流传输线示意图

实验中,测量的未经过束流传输线聚焦的电子束与聚焦后的电子束在波荡器中的横向尺寸分别为 800 μm 和 100 μm 左右,证明该束流传输线对 LPA 电子束具有显著的聚焦效果。最终在实验中探测到了最高辐射能量 150 nJ,中心波长为 27 nm 的辐射光,其单发光子数可达 10^{10} ,对应的电子能量为 490 MeV、能散 0.5%、电荷量 30 pC、发散角 0.2 mrad。通过对比第二块和第三块波荡器中产生的辐射能量,电子束在第三块波荡器中的能量增益最高可达 100 倍,证明了辐射的能量增益已经进入了指数增益区域。

4 总结与展望

自由电子激光作为最先进的光源成为科学研究的强大工具,能够为各学科的发展带来新的突破。使用激光等离子体加速器作为驱动源,在提高 FEL 亮度和时间分辨率的同时,极大地降低了 FEL 的规模 and 成本,基于激光等离子体加速器的高增益 FEL 原理的实验验证也为台式化 FEL 的成功研制带来了希望。目前基于激光等离子体加速器的台式化 FEL 的研究已经由增益验证阶段进入品质提升阶段,提高辐射功率和实现硬 X 射线波段 FEL 成为了研究的重点。FEL 的功率提升依赖于电子束的品质,通过机器学习等主动优化技术可以进一步提升电子束的品质,发展新的注入和加速的机制有望为激光等离子体加速电子束的品质提升带来新的突破,结合先进的波荡器技术和使用高能量的电子束有望实现更短波长的 FEL 辐射。下一步将结合当前高品质电子束与 TGU 等能散补偿方案,通过匹配合适的电子束参数和操纵相空间分布等方案期望获得更高的辐射增益,进一步提升辐射的功率。

参考文献:

- [1] Daukantas P. Synchrotron light sources for the 21st century[J]. *Optics and Photonics News*, 2021, 32(9): 32-39.
- [2] Tajima T, Dawson J M. Laser electron accelerator[J]. *Physical Review Letters*, 1979, 43(4): 267-270.
- [3] Gordon D, Tzeng K C, Clayton C E, et al. Observation of electron energies beyond the linear dephasing limit from a laser-excited relativistic plasma wave[J]. *Physical Review Letters*, 1998, 80(10): 2133-2136.
- [4] Leemans W P, Gonsalves A J, Mao H S, et al. Multi-GeV electron beams from capillary-discharge-guided subpetawatt laser pulses in the self-trapping regime[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113: 245002.
- [5] Gonsalves A J, Nakamura K, Daniels J, et al. Petawatt laser guiding and electron beam acceleration to 8 GeV in a laser-heated capillary discharge waveguide[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122: 084801.
- [6] Nakajima K. Towards a table-top free-electron laser[J]. *Nature Physics*, 2008, 4(2): 92-93.
- [7] Emma C, Van Tilborg J, Assmann R, et al. Free electron lasers driven by plasma accelerators: status and near-term prospects[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2021, 9: e57.
- [8] Sarri G. Laser-driven positron sources for applications in fundamental science and industry[C]//Proceedings of SPIE 11790, Applying Laser-driven Particle Acceleration II, Medical and Nonmedical Uses of Distinctive Energetic Particle and Photon Sources: SPIE Optics + Optoelectronics Industry Event. 2021: 11790F.
- [9] Huang Zhirong, Kim K J. Review of X-ray free-electron laser theory[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2007, 10: 034801.
- [10] Faure J, Glinec Y, Pukhov A, et al. A laser-plasma accelerator producing monoenergetic electron beams[J]. *Nature*, 2004, 431(7008): 541-544.

- [11] Chen Min, Sheng Zhengming, Ma Yanyun, et al. Electron injection and trapping in a laser wakefield by field ionization to high-charge states of gases[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 99: 056109.
- [12] Buck A, Wenz J, Xu J, et al. Shock-front injector for high-quality laser-plasma acceleration[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110: 185006.
- [13] Yu L L, Esarey E, Schroeder C B, et al. Two-color laser-ionization injection[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112: 125001.
- [14] Tomassini P, Terzani D, Baffigi F, et al. High-quality 5 GeV electron bunches with resonant multi-pulse ionization injection[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2020, 62: 014010.
- [15] Xu X L, Li F, An W, et al. High quality electron bunch generation using a longitudinal density-tailored plasma-based accelerator in the three-dimensional blowout regime[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2017, 20: 111303.
- [16] Pollock B B, Clayton C E, Ralph J E, et al. Demonstration of a narrow energy spread, ~ 0.5 GeV electron beam from a two-stage laser wakefield accelerator[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107: 045001.
- [17] Liu J S, Xia C Q, Wang W T, et al. All-optical cascaded laser wakefield accelerator using ionization-induced injection[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107: 035001.
- [18] Zhang Zhijun, Li Wentao, Liu Jiansheng, et al. Energy spread minimization in a cascaded laser wakefield accelerator via velocity bunching[J]. *Physics of Plasmas*, 2016, 23: 053106.
- [19] Brinkmann R, Delbos N, Dornmair I, et al. Chirp mitigation of plasma-accelerated beams by a modulated plasma density[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118: 214801.
- [20] Manahan G G, Habib A F, Scherkl P, et al. Single-stage plasma-based correlated energy spread compensation for ultrahigh 6D brightness electron beams[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15705.
- [21] Li F, Hua J F, Xu X L, et al. Generating high-brightness electron beams via ionization injection by transverse colliding lasers in a plasma-wakefield accelerator[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111: 015003.
- [22] Wang W T, Li W T, Liu J S, et al. High-brightness high-energy electron beams from a laser wakefield accelerator via energy chirp control[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117: 124801.
- [23] Ke L T, Feng K, Wang W T, et al. Near-GeV electron beams at a few per-mille level from a laser wakefield accelerator via density-tailored plasma[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126: 214801.
- [24] Shaloo R J, Dann S J D, Gruse J N, et al. Automation and control of laser wakefield accelerators using Bayesian optimization[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 6355.
- [25] J alas S, Kirchen M, Messner P, et al. Bayesian optimization of a laser-plasma accelerator[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126: 104801.
- [26] Dornmair I, Floettmann K, Maier A R. Emittance conservation by tailored focusing profiles in a plasma accelerator[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2015, 18: 041302.
- [27] Fang Ming, Wang Wentao, Zhang Zhijun, et al. Long-distance characterization of high-quality laser-wakefield-accelerated electron beams[J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16: 040201.
- [28] van Tilborg J, Steinke S, Geddes C G R, et al. Active plasma lensing for relativistic laser-plasma-accelerated electron beams[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 115: 184802.
- [29] Thaur y C, Guillaume E, Döpp A, et al. Demonstration of relativistic electron beam focusing by a laser-plasma lens[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6860.
- [30] van Tilborg J, Barber S K, Isono F, et al. Free-electron lasers driven by laser plasma accelerators[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2017, 1812: 020002.
- [31] Wu Fenxiang, Zhang Zongxin, Yang Xiaojun, et al. Performance improvement of a 200TW/1Hz Ti: sapphire laser for laser wakefield electron accelerator[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 131: 106453.
- [32] Maier A R, Meseck A, Reiche S, et al. Demonstration scheme for a laser-plasma-driven free-electron laser[J]. *Physical Review X*, 2012, 2: 031019.
- [33] Huang Zhirong, Ding Yuantao, Schroeder C B. Compact X-ray free-electron laser from a laser-plasma accelerator using a transverse-gradient undulator[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109: 204801.
- [34] Couprie M E, Labat M, Evain C, et al. An application of laser-plasma acceleration: towards a free-electron laser amplification[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2016, 58: 034020.
- [35] Delbos N, Werle C, Dornmair I, et al. Lux - A laser-plasma driven undulator beamline[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2018, 909: 318-322.
- [36] Liu Tao, Zhang Tong, Wang Dong, et al. Compact beam transport system for free-electron lasers driven by a laser plasma accelerator[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2017, 20: 020701.
- [37] Schlenvoigt H P, Haupt K, Debus A, et al. A compact synchrotron radiation source driven by a laser-plasma wakefield accelerator[J]. *Nature Physics*, 2008, 4(2): 130-133.
- [38] Fuchs M, Weingartner R, Popp A, et al. Laser-driven soft-X-ray undulator source[J]. *Nature Physics*, 2009, 5(11): 826-829.
- [39] André T, Andriyash I A, Loulergue A, et al. Control of laser plasma accelerated electrons for light sources[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 1334.
- [40] Wang Wentao, Feng Ke, Ke Lintong, et al. Free-electron lasing at 27 nanometres based on a laser wakefield accelerator[J]. *Nature*, 2021, 595(7868): 516-520.