



## 高品质激光尾波场电子加速器

蒋康男 冯珂 柯林佟 余昌海 张志钧 秦志勇 刘建胜 王文涛 李儒新

### High-quality laser wakefield electron accelerator

Jiang Kang-Nan Feng Ke Ke Lin-Tong Yu Chang-Hai Zhang Zhi-Jun Qin Zhi-Yong Liu Jian-Sheng  
Wang Wen-Tao Li Ru-Xin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 084103 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201993

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201993>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

锐真空-等离子体边界倾角对激光尾波场加速中电子注入的影响

Effects of slant angle of sharp plasma-vacuum boundary on electron injection in laser wakefield acceleration

物理学报. 2020, 69(3): 035201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191332>

激光尾波场驱动准连续小角度电子束研究进展

Generation of ultrafast broadband small angle hundreds MeV electron bunches from laser wakefield acceleration

物理学报. 2017, 66(15): 154101 <https://doi.org/10.7498/aps.66.154101>

基于混合注入机制的级联尾场电子加速

Mixed injection mechanism assisted cascaded laser wakefield accelerator

物理学报. 2019, 68(17): 175201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190484>

相对论皮秒激光在低密度等离子体中直接加速的电子束的横向分布特征研究

Transverse distribution of electron beam produced by relativistic picosecond laser in underdense plasma

物理学报. 2019, 68(19): 195203 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191106>

谐振腔内的高质量圆对称艾里光束的产生方法

Generation of high-quality circular Airy beams in laser resonator

物理学报. 2020, 69(1): 014205 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191088>

高光束质量、高功率稳定性激光器的设计及实验研究

Design and experimental study on high quality beam and high stability power of laser

物理学报. 2018, 67(7): 074201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171932>

专题: 超短超强激光等离子体物理

## 高品质激光尾波场电子加速器\*

蒋康男<sup>1)2)</sup> 冯珂<sup>1)</sup> 柯林佟<sup>1)3)</sup> 余昌海<sup>1)</sup> 张志钧<sup>1)</sup> 秦志勇<sup>1)</sup>  
刘建胜<sup>1)</sup> 王文涛<sup>1)†</sup> 李儒新<sup>1)2)‡</sup>

1) (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)

2) (上海科技大学物质科学与技术学院, 上海 200031)

3) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2020年11月26日收到; 2020年12月31日收到修改稿)

激光尾波场电子加速的加速梯度相比于传统直线加速器高了3—4个量级, 对于小型化粒子加速器与辐射源的研制具有重要的意义, 成为当今国内外的研究热点. 台式化辐射源应用需求的提高, 特别是自由电子激光装置的快速发展, 对电子束流品质提出了更高的要求, 激光尾波场电子加速的束流品质和稳定性是目前实现新型辐射源的首要障碍. 本文归纳整理了中国科学院上海光学精密机械研究所电子加速研究团队十年来在研制台式化激光尾波场电子加速器过程中采取的方案和取得的进展. 例如率先提出了注入级和加速级分离的级联加速方案, 通过实验获得了 GeV 量级的电子束能量; 基于级联加速方式利用能量啁啾控制, 实验获得世界最高品质的电子束流; 通过优化激光系统稳定性和特殊的气体喷流结构, 获得稳定的高品质电子束流输出等. 这一系列实验结果有利于进一步推进激光尾波场电子加速器的应用.

关键词: 激光尾波场加速器, 高品质电子束, 六维相空间亮度

PACS: 41.75.Jv, 52.38.-r

DOI: 10.7498/aps.70.20201993

## 1 引言

高能电子束广泛应用于同步辐射光源、自由电子激光、正负电子对撞机等大科学装置产生紫外光源、高能 X 射线和  $\gamma$  射线等, 在揭示电子动力学过程、探测生物分子结构以及记录化学反应过程等诸多研究领域扮演了重要的角色, 极大地拓宽了人类对世界的认知. 高能电子束的产生通常依赖于传统射频直线加速器, 而受制于射频腔体的击穿电压, 其加速梯度通常限制在大约 100 MV/m. 为了进一步提升电子束能量, 加速器的规模与成本需要

成倍地增加, 因此寻求一种更高加速梯度的机制成为亟待解决的问题. 1979 年 Tajima 和 Dawson<sup>[1]</sup> 首次提出激光尾波场加速 (laser wakefield acceleration, LWFA) 的概念, 当一束强激光入射至等离子体中, 其有质动力将排开背景等离子体中的电子, 进而激发出大幅的尾波场用于加速粒子. 由于等离子体中不存在击穿电压的限制, 其加速梯度可达 100 GV/m, 比传统的射频加速器高出三个数量级, 对于小型化粒子加速器的研制具有重要意义. LWFA 产生的电子束具有高流强、短脉宽的特点, 在高亮度 X 射线、 $\gamma$  射线源以及台式化自由电子激光的研制等方面具有广阔的前景.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11991072, 11875065, 11127901)、中国科学院战略性先导科技专项 (B 类) (批准号: XDB16)、国家自然科学基金 (批准号: 18JC1414800, 18ZR1444500)、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 (批准号: Y201952) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [wwt1980@siom.ac.cn](mailto:wwt1980@siom.ac.cn)‡ 通信作者. E-mail: [ruxinli@mail.siom.ac.cn](mailto:ruxinli@mail.siom.ac.cn)

LWFA 对激光强度要求很高,很长一段时间内,受限于缺乏激发尾场的驱动源,无法在实验上获得单能电子束. 1985年,啁啾脉冲放大技术(CPA)的提出<sup>[2]</sup>,使得超强超短激光装置快速发展,为激光尾波场的激发提供了相对论强度的驱动光源. 2004年,来自英国、美国、法国的三个研究团队在实验上首次获得了百 MeV 的准单能电子束,相关研究成果也以“梦之束”为标题在《Nature》封面进行了报道<sup>[3-5]</sup>,标志着小型化粒子加速器的开端,至此,越来越多的研究团队投身于 LWFA 的研究中. 2006年,Leemans 团队<sup>[6]</sup>进一步将电子束能量提高至 GeV 量级. 2007年 Lu 等<sup>[7]</sup>通过模拟优化了尾波场模型,为激光尾波场电子加速提供了可靠的理论依据,并提出如何利用单级尾波场加速获得数 GeV 能量的电子束. 2013年,德克萨斯大学实验获得了 2 GeV 的电子束<sup>[8]</sup>. 在此以后,激光尾波场电子加速能量的世界纪录一直被 Leemans 团队保持——2014年,利用毛细管放电波导技术获得了峰值能量为 4 GeV 的电子束<sup>[9]</sup>; 2019年,通过长 20 cm 的毛细管放电波导引导激光以保持良好聚焦,得到了能量为 8 GeV 的电子束<sup>[10]</sup>,这也是目前国际上已经报道的基于 LWFA 电子的最高能量.

为实现 LWFA 的电子束的操纵与品质优化,一系列新的注入机制与加速方案相继被提出. 中国科学院物理研究所在 2006 年提出了电离注入,劳伦斯利弗莫尔国家实验室在实验上进一步验证并获得了约 700 MeV 的电子<sup>[11,12]</sup>. 德国马普所通过气体密度激波实现前端冲击注入,实现了比自注入更稳定的注入,获得了绝对能散较低的高品质电子束<sup>[13]</sup>. 上海交通大学、美国劳伦斯伯克利实验室(LBNL)、清华大学和北京大学等先后开展了基于双色激光驱动尾波场控制电子束性能的研究,证明了这是一种可以产生低发射度或低能散的电子束的方法<sup>[14-17]</sup>. 不同于常规的单级加速,中国科学院上海光学精密机械研究所和美国两个研究团队<sup>[18-20]</sup>在级联加速方面先后获得了突破. 级联加速方案的提出,解决了难以平衡注入级和加速级等离子体密度的问题,为高能量高品质电子束的产生奠定了基础. 随后,许多相关研究团队在基于级联加速的方案上,通过控制激光聚焦、等离子体密度分布、电子注入方式等,获得了更高品质的电子束. 韩国光州先进光子学研究所<sup>[21]</sup>基于级联加速的方式,

通过加速电子随着激光聚焦位置的改变在等离子体中获得引导,得到了最高能量为 3 GeV 的电子束. 美国 LBNL 利用两束激光脉冲独立激发等离子体实现了多级加速,并模拟证明了低密度等离子体条件下两极间耦合效率可趋近于 100%<sup>[22]</sup>. 为了规避失相长度的限制,解决激光无法在单级结构将电子能量推进到更高的问题,罗彻斯特大学和巴黎理工学院先后提出了利用阶梯级反射实现时空耦合的无失相加速<sup>[23,24]</sup>,这种方案对激光器能量的需求较高.

除著名的超强超短激光实验室外,许多传统的直线加速器实验室,例如斯坦福直线加速器中心(SLAC)、法国应用光学实验室(LOA)、德国电子同步加速器研究所(DESY)等,也都纷纷将目光投向了这一领域,开始在该领域展开深入的实验研究,加快了激光尾波场电子加速技术和应用技术的结合. 德国 DESY 在 2020 年,连续获得十万发电子束,为实现长时间稳定运行的激光等离子体加速器带来了曙光<sup>[25]</sup>,精确测量电子束能量漂移和抖动,为电子束加速获得反馈与主动控制提供了依据.

经过国内外各研究团队持续的努力, LWFA 在近十几年得到了飞速发展,电子品质也逐步得到了完善. 然而受限于强场激光技术的发展、激光与等离子体相互作用的不稳定性、加速场的不均匀性等,目前电子束品质,无论是稳定性、能散度还是重频,与传统射频加速器相比仍有一定差距. 要做到 LWFA 的稳定可用,实现真正意义上的小型化加速“器”,需要不断优化其性能来满足其在各种新型台式化辐射源中的应用需求.

## 2 级联加速

中国科学院上海光学精密机械研究所电子加速研究团队十年来利用自身在研制百太瓦和拍瓦级飞秒激光装置的优势,通过采用各种新方案在研制台式化 LWFA 中取得了许多重要进展. 2008 年,实验室自主研发了最高输出功率为 890 TW 的钛宝石飞秒激光装置,并依托于这套装置建成了激光驱动实验平台<sup>[26]</sup>. 激光驱动实验平台的搭建实现了实验自主化,为激光等离子体电子加速的研究提供了必要的研究条件,成为国内率先开展激光尾波场电子加速实验研究的研究团队之一. 同期,中国工程物理研究院激光聚变研究中心、上海交通大学、

清华大学、北京大学等团队也开展了这一国际前沿领域的研究<sup>[11,27-30]</sup>.

利用搭建的平台,如图1所示,以理论、模拟和实验等多种方式进行 LWFA 的研究,优化了焦斑分析方法和能谱分析参数的程序,发展了电荷量标定方法,实现对电量更为快速和精准的测量. 首先开展的是百太瓦激光与氢气喷流相互作用进行电子加速的实验研究,分别研究了不同长度的气体喷流情况下激光加速电子. 增加气体喷流长度到 1.5 mm 时,获得了电量约为 2.6 nC,截止能量为 80 MeV 的大电量电子束团. 通过诊断得知激光光谱展宽与电量存在相关性,发现了注入和后向拉曼散射不稳定性之间的关联. 随后的实验进一步利用电离注入的方式,以较低的激光强度获得了峰值

能量为 117 MeV 的电子束. 通过注入方式、气体密度、激光强度等参数的改变,逐步在实验中实现了在一定范围内能量、能散、电量可调的电子束流.

初期实验使用的等离子体密度都高于  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ,获得的电子束具有能量低、能散度差和发散角大等缺陷. 根据 Lu 等<sup>[7,31]</sup>优化后的加速模型可以得出等离子体密度过高会导致失相长度过短,并且自聚焦会加剧激光泵浦损耗,电子能量难以提升;而当等离子体密度过低时,电子则不容易发生注入. 为了解决这一矛盾,2011年,中国科学院上海光学精密机械研究所研究团队提出了将注入级和加速级分离的级联加速方案<sup>[20]</sup>,并通过实验证明了方案的可行性. 这一方案将气体池结构分为两部分(如图2所示),第一部分注入高密度混合气体,可实现电子

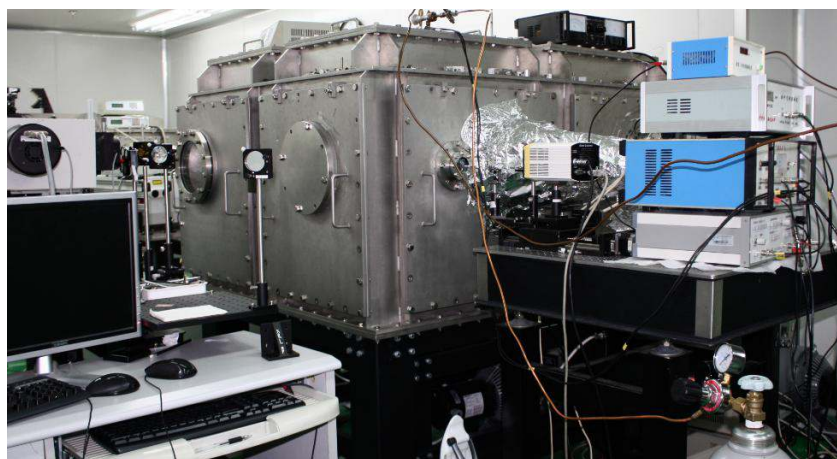


图1 基于自制 890 TW 激光器建立的激光尾波场电子加速实验平台

Fig. 1. Laser wakefield electron acceleration experiment platform based on self-made 890 TW laser.

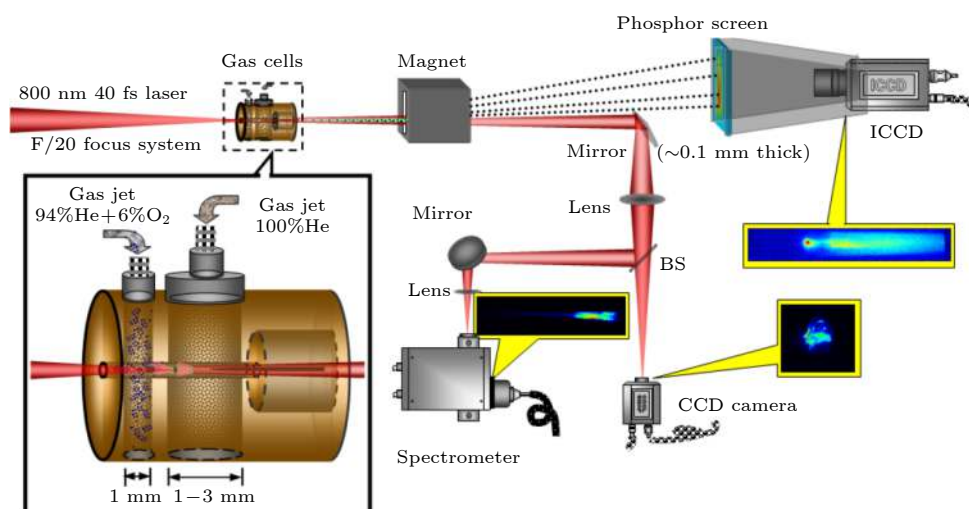


图2 级联加速实验装置图<sup>[20]</sup>

Fig. 2. The experiment device of cascade acceleration<sup>[20]</sup>.

的快速注入;第二部分注入低密度纯氦气,可获得较长的失相长度,在小于1 cm激光自聚焦传输长度内实现对电子束更为高效的加速.混合气体中 $H_2$ 和 $O_2$ 的掺杂比兼顾电子易于注入和避免激光泵浦能量的过多损耗.同时为保证激光在加速级能够维持较好的自聚焦传输,激光聚焦位置处于注入级和加速级中间.实验证明了随着加速级长度的延长,能量增益得到极大的提升.级联的优点还体现在可以实现对注入级和加速器气体密度的独立控制,通过调节和优化加速级气体密度和长度,最终产生了能量0.8 GeV、能散25%、发散角2.6 mrad、电荷量为3.7 pC的准单能电子束,如图3所示.随后,韩国先进光子学研究所也是利用该级联加速方案实现了2.3 GeV的能量突破<sup>[21]</sup>.

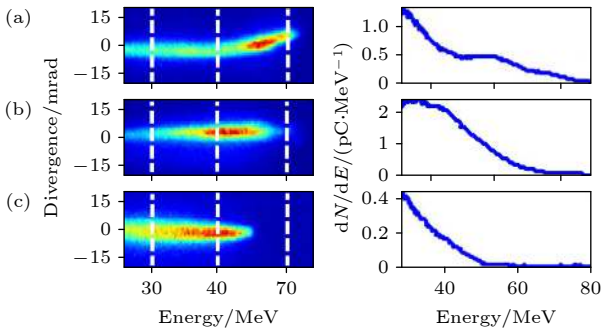


图3 级联加速后的电子束能谱图<sup>[20]</sup>

Fig. 3. Electron beam energy spectrum based on cascade acceleration<sup>[20]</sup>.

前期级联电子加速实验采用了电离注入,电离注入主要通过俘获高原子序数气体的内层电子,控制掺杂成分和掺杂比可以实现对电子注入电量和绝对能散的控制,但同时由于注入时所需要的激光强度较低,在激光导引过程中容易发生连续注入导致产生大能散电子束,甚至是连续谱.为有效解决电离注入造成的能散过大的问题,需要发展一种在注入级实现较低绝对能散的方案来优化电子束能散.2013年,中国科学院上海光学精密机械研究所研究团队采用了基于梯度注入<sup>[32]</sup>的级联加速方案,这是一种通过等离子体膨胀产生的密度梯度来控制电子注入的方式.两段气体池均充入纯氦气,密度梯度分布可由改变两个气体池的间距或者充入气体的密度差实现主动控制.在实验中通过改变第二级等离子体密度使其刚好低于电子注入所需要的条件,可以有效控制注入级的绝对能散.随着加速级等离子体密度的进一步降低,空泡尺寸会显著变大,这样初始在注入级第二个空泡内的电子就将注入到加速级的第一个空泡周期内进行加速,通过密度控制可以实现该团电子束被注入到加速级更为优化的相位,最终被持续加速到0.5 GeV,其能散度将显著下降到约3%,如图4所示.此外,通过将加速级的长度增加并选择合适的等离子体密度,获得了峰值能量为1.3 GeV的准单能电子束,如图5所示.

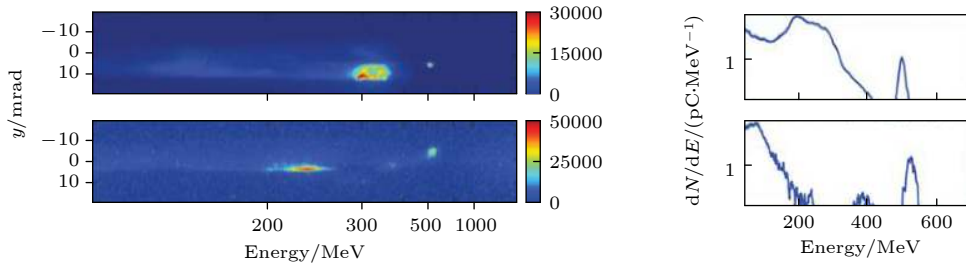


图4 能散度3%电子束能谱图<sup>[32]</sup>

Fig. 4. Electron beam energy spectrum with 3% energy spread<sup>[32]</sup>.

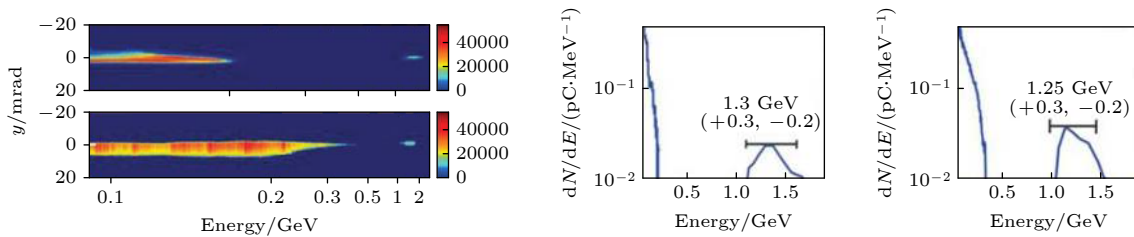


图5 峰值能量>1 GeV 能量电子能谱图<sup>[32]</sup>

Fig. 5. Electron beam energy spectrum with >1 GeV peak energy<sup>[32]</sup>.

相比于单级加速机制, 级联加速机制不但在通过控制电子束注入过程优化电子束品质方面具有一定的优势, 还可以控制电子束注入到加速级的相位, 充分利用加速级获得更高能量的电子束. 同时也发现, 无论是基于电离注入还是梯度注入的级联电子加速实验中, 耦合效率均低于 20%, 需要开展更多的研究工作来提高级联的耦合效率, 才可以将两级级联方案推进到多级级联.

### 3 高品质电子束

研究发现, 依赖于单发的激光装置进行 LWFA 的研究陷入瓶颈, 驱动光源重频和稳定性直接影响到激光尾波场电子束性能的优化. 2012 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所开展“新一代超强超短激光综合实验装置”的研制, 为 LWFA 的研究提供了极大的便利, 项目的主要目标就是利用激光尾波场电子束研制台式化的自由电子激光. 作为驱动激光尾波场电子加速发展的重要应用之一, X 射线自由电子激光对电子束流品质提出了极高的要求, 例如千分量级的能散度、百微米的束团尺寸等, 并具有足够的重频和稳定性. 以当时的电子束品质, 根本无法实现相干辐射输出, 如何获得高能量高品质的电子束已成为各研究团队亟待解决的问题.

中国科学院上海光学精密机械研究所自主研发的百 TW 级重频钛宝石激光装置, 利用多级啁啾脉冲放大技术, 实现了激光器 200 TW, 1 Hz 的稳定输出, 能量稳定度保持在 0.65% 以内<sup>[33]</sup>, 高性能激光驱动源为进一步开展高品质激光尾波场电子加速器的研究提供了先决条件. 为进一步提高电子束品质, 中国科学院上海光学精密机械研究所于 2016 年提出了一种基于密度峰实现能量啁啾控制<sup>[34]</sup>以获得高品质电子束的实验方案. 实验采用

级联加速方案, 通过上下两个喷嘴进行气体注入, 调节两个喷嘴的相对水平位置, 可以产生一个宽度约 250  $\mu\text{m}$  的高密度区. 利用形成的密度峰对电子束第二次自注入的抑制效应, 有效地实现了注入截止, 此外, 电子束在密度下降沿处会经过一段可实现能量啁啾负斜率尾场, 在束流尾部的低能电子获得较高的能量增益, 在头部的高能电子获得较低的能量增益. 通过调节等离子体密度分布, 最终获得能量为 530—580 MeV, 能散小于 1%, 平均发散角约为 0.2 mrad 的电子束, 结果如图 6 所示. 在这个工作中, 首次将传统加速器描述电子束流品质的六维相空间亮度引入, 用于表征激光尾波场电子加速束流品质. 实验最终获得的电子束六维相空间亮度<sup>[35]</sup>可达  $6.5\text{--}10^{15}$  A/( $\text{m}^2\cdot 0.1\%$ ), 如图 7 所示, 这是已报道的 LWFA 的 5 倍, 也首次接近了目前最先进直线加速器所获电子束亮度, 这种电子束流将有望实现台式化的自由电子激光.

同年, 该研究团队提出了利用电子束速度聚束 (velocity bunching) 效应来获得千分级超低能散高品质电子束的新方案<sup>[36]</sup>. 基于激光尾波场电子加速器, 该方案设计了三段等离子体区域, 分别为注入级、压缩级和加速级, 主要原理如下: 首先, 在注入级控制电子束注入, 电子束在注入过程中由于前端电子更早被捕获而被加速到更高能量, 注入结束时电子束为能量负啁啾分布; 然后, 完成注入的电子束传输进入压缩级, 由于电子束所处加速场存在前后梯度差, 在电子束 Beam Loading 效应不显著的情况下, 电子束会发生相空间旋转, 导致其能量啁啾转变为正啁啾分布, 即电子束尾部电子能量更高, 随着电子束的传输, 电子束长度会被压缩甚至发生前后电子位置交换; 最后, 通过控制压缩级长度, 将长度被压缩且能量啁啾重新演化为负

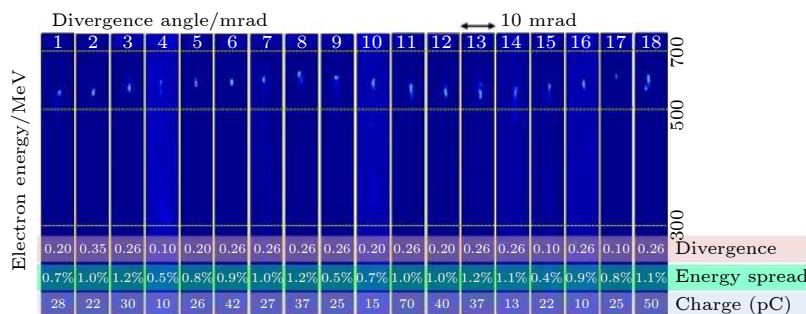


图 6 级联加速后的电子束角分辨能谱<sup>[34]</sup>

Fig. 6. Angle resolved electron beams energy spectrum based on cascade acceleration<sup>[34]</sup>.

啁啾的电子束传输进入加速级, 由于电子束长度获得极大压缩, 电子束会在更高的能量状态下达到能量啁啾补偿点, 从而得到超低相对能散电子束的输出. 采用一维理论推导和二维 PIC (particle-in-cell) 模拟证明了该方案的可行性, 并在模拟中获得了能量为 784 MeV, 电荷量为 4.5 pC, 能散为 0.2% 的超低能散高品质电子束输出.

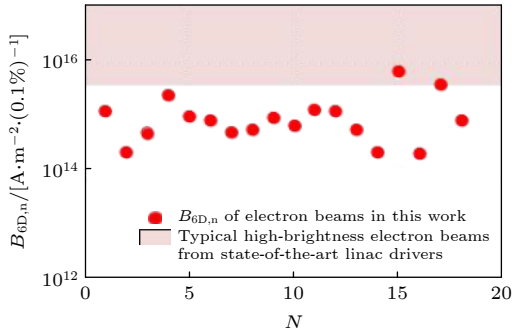


图 7 获得的高品质的电子束六维相空间亮度<sup>[34]</sup>

Fig. 7. The six-dimensional phase space brightness of obtained electron beams<sup>[34]</sup>.

通过控制电子在尾波场中的注入过程可以有效提升注入时电子束的品质, 例如可以压缩绝对能散、提升电量或者降低发射度等, 这对于优化最终获得的电子束的品质是尤为重要的. 2018 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所设计了一种 U 型尖峰结构, 产生了一种更尖锐的气体密度“激波”, 可以更有效地压缩电子注入的绝对能散<sup>[37]</sup>. 通过调整气体喷嘴和 U 型尖峰结构的相对位置, 超音速气流会产生局部高密度区, 如图 8 所示. 三维模拟证明, 该结构有利于将电子束加速到更高能量, 并具有更低的能散. 此外, 通过调节激波角度可实现对电子束电量和能量的主动控制.

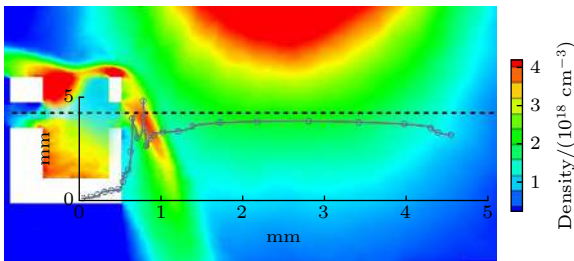


图 8 U 型尖峰结构形成等离子体分布模拟图<sup>[37]</sup>

Fig. 8. Simulation of plasma distribution formed by U-shaped spike structure<sup>[37]</sup>.

为了提升高性能电子束的稳定性和重频, 实现稳定可用的激光尾波场电子加速器, 中国科学院上海

光学精密机械研究所对 CPA 激光驱动源各项输出指标进行了优化. 2018 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所采用实验室温控小于  $\pm 0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 、利用自准直反馈等技术手段, 有效提升激光器种子激光脉冲光束指向稳定性到小于  $1.5 \text{ } \mu\text{rad}$ , 并改进功率放大器, 使激光器在 200 TW, 1 Hz 的条件下, 实现连续 90 min 能量抖动小于 0.55% 的稳定输出<sup>[38]</sup>. 激光器重频、高稳定性的脉冲输出, 对于激光尾波场电子加速器的研制过程极为重要, 它可以有效确保电子输出的重复性, 并可进一步实现对电子束流性能的优化. 利用优化的激光器, 通过调节等离子体密度分布同激光参数匹配, 寻找连续稳定产生高品质电子束流的实验条件并获得了能量为 680 MeV, 稳定性为 3%, 峰值流强为 10 kA 的电子束 (连续采集 300 发次), 电子能谱图如图 9 所示. 高稳定性有利于电子束品质的精度优化, 高品质的、具有一定重频的电子束, 对于实现电子长距离聚焦传输研制台式化自由电子激光具有重要意义.

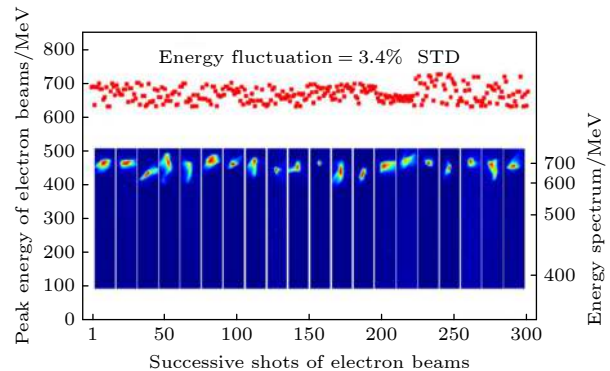


图 9 连续 300 发电子加速峰值能量分布及部分能谱图

Fig. 9. Accelerated peak energy distribution of 300 consecutive electrons and part of energy spectrum.

通过诊断实时监测激光和等离子体相互作用过程获得参数反馈, 是加速电子从产生到实现主动控制以获得更高质量的必要条件. 中国科学院上海光学精密机械研究所研究团队采用多种诊断方式, 以确保实验量化可控. 除了激光输出参数的实时监测外, 对电子加速的诊断主要包括等离子体通道诊断、电子束流诊断和辐射测量三个方面. 等离子体通道诊断包括等离子体密度、等离子体区域长度、磁场测量等, 束流诊断包括电子束能量、能散、尺寸、电量、发射度、脉宽等表征参数; 辐射测量主要通过测量相互作用过程中的伴生辐射, 例如 Betatron

辐射、谐波等,实现对相互作用过程的反演.多种测量手段,除了优化电子束流品质外,还可以通过模拟和构建模型对相互作用过程进行反演.在激光尾波场电子注入过程监测中,在通过迈克尔孙干涉仪测量等离子体密度的基础上,利用法拉第磁光偏转效应搭建了具有时间分辨能力的激光探针,可以单发探测来自不同位置的电子束团,同时实现电子束团在注入级和加速级的监测.对激光在低密度等离子体导引中的多丝过程进行观察,证明多丝过程同时会激发多个等离子体尾波对电子进行加速,相比于单丝的情况,激光多丝化后加速的电子品质较差<sup>[39]</sup>,应该优化激光的聚焦质量,尽量避免这一过程.在电子束参数测量方面,除了借鉴传统加速器中普遍采用的能谱仪、ICT、电子束流剖面分析仪并加以改进外,中国科学院上海光学精密机械研究所团队利用测量 Betatron 辐射实时测量电子束横向发射度<sup>[40]</sup>.通过二维 PIC 模拟,获得了和实验测量一致的结果,证明了用测量 Betatron 辐射计算电子束横向发射度方案的可行性.

## 4 总 结

中国科学院上海光学精密机械研究所电子加速研究团队十年来一直致力于优化激光尾波场电子加速所获得的电子束流的品质,实现一种可用的激光尾波场电子加速器.通过在国际率先实验验证了分离加速级与注入级的级联加速方案进入该领域的研究;进一步通过多年的理论和模拟研究,探究有效控制电子注入并优化加速过程各类方案,例如提出了前端冲击注入的尖峰结构的改进方案,构造特殊的等离子体密度分布利用能量啁啾的方式获得高品质电子束;首次提出了通过速度聚束实现千分之二超低能散度的方案等.采用多种技术方案改善优化激光驱动源性能,实现了高性能电子束的稳定输出.设计并优化了多种适用于激光尾波场电子加速的诊断设备,实现对来自不同位置的电子束团的单发测量,利用 Betatron 辐射反演测量超低发射度,探讨了激光多丝化后对产生电子束品质的影响等.

目前基于激光尾波场加速的电子在性能和重复频率等方面还不足以满足应用需求,仍需要更多的理论和实验技术方面的研究,包括新注入机制

探索、空泡结构的高分辨测量、超长低密度等离子体通道研制、机器学习辅助电子束性能优化等.本文对所在团队近年研究进行归纳与总结,旨在对激光尾波场电子加速的研究有更完备和清晰的认识,也希望能促进交叉学科领域的合作和交流.

## 参考文献

- [1] Tajima T, Dawson J M 1979 *Phys. Rev. Lett.* **43** 267
- [2] Strickland D, Mourou G 1985 *Opt. Commun.* **56** 219
- [3] Geddes C G R, Toth C, Van Tilborg J, et al. 2004 *Nature* **431** 538
- [4] Mangles S P D, Murphy C D, Najmudin Z, et al. 2004 *Nature* **431** 535
- [5] Faure J, Glinec Y, Pukhov A, Kiselev S, et al. 2004 *Nature* **431** 541
- [6] Leemans W P, Nagler B, Gonsalves A J, et al. 2006 *Nat. Phys.* **2** 696
- [7] Lu W, Tzoufras M, Joshi C, et al. 2007 *Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams* **10** 061301
- [8] Wang X M, Zgadzaj R, Fazel N, et al. 2013 *Nat. Commun.* **4** 1988
- [9] Leemans W P, Gonsalves A J, Mao H S, et al. 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 245002
- [10] Gonsalves A J, Nakamura K, Daniels J, et al. 2019 *Phys. Rev. Lett.* **122** 084801
- [11] Chen M, Sheng Z M, Ma Y Y, et al. 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 056109
- [12] Froula D H, Clayton C, Döppner T, et al. 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 215006
- [13] Buck A, Wenz J, Xu J, et al. 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 185006
- [14] Xu X L, Wu Y P, Zhang C J, et al. 2014 *Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams* **17** 061301
- [15] Hu R H, Lu H Y, Shou Y R, et al. 2016 *Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams* **19** 091301
- [16] Yu L L, Esarey E, Schroeder C B, et al. 2014 *Phys. Rev. Lett.* **112** 125001
- [17] Thomas A G R, Murphy C D, Mangles S P D, et al. 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 255002
- [18] Pollock B B, Clayton C E, Ralph J E, et al. 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 045001
- [19] Gonsalves A J, Nakamura K, Lin C, et al. 2011 *Nat. Phys.* **7** 862
- [20] Liu J S, Xia C Q, Wang W T, et al. 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 035001
- [21] Kim H T, Pae K H, Cha H J, et al. 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 165002
- [22] Steinke S, VanTilborg J, Benedetti C, et al. 2016 *Nature* **530** 190
- [23] Palastro J P, Shaw J L, Franke P, et al. 2020 *Phys. Rev. Lett.* **124** 134802
- [24] Caizergues C, Smartsev S, Malka V, et al. 2020 *Nat. Photonics* **14** 475
- [25] Maier A R, Delbos N M, Eichner T, et al. 2020 *Phys. Rev. X* **10** 031039
- [26] Liang X Y, Leng Y X, Wang C, et al. 2007 *Opt. Express* **15** 15335
- [27] Gu Y Q, Peng H S, Wang X X, et al. 2006 *Phys. Plasmas* **14** 040703



- [28] Wen M, Wu H C, Jin L L, et al. 2012 *Phys. Plasmas* **19** 083112
- [29] Tzoufras M, Lu W, Tsung F S, et al. 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 145002
- [30] Zhang L, Chen L M, Wang W M, et al. 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 014104
- [31] Lu W, Huang C, Zhou M, et al. 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 165002
- [32] Wang W T, Li W T, Liu J S, et al. 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 243501
- [33] Xu Y, Lu J, Li W, et al. 2016 *Opt. Laser Technol.* **79** 141
- [34] Wang W T, Li W T, Liu J S, et al. 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 124801
- [35] Di mitri S, Cornacchia M, et al. 2014 *Phys. Rep.* **539** 1
- [36] Zhang Z J, Li W T, Liu J S, et al. 2016 *Phys. Plasmas* **23** 053106
- [37] Fang M, Zhang Z J, Wang W T, et al. 2018 *Plasma Phys. Controlled Fusion* **60** 075008
- [38] Wu F X, Zhang Z X, Yang X J, et al. 2020 *Opt. Laser Technol.* **131** 106453
- [39] Li W T, Liu J S, Wang W T, et al. 2013 *Phys. Plasmas* **20** 113106
- [40] Qin Z Y, Yu C H, Wang W T, et al. 2018 *Phys. Plasmas* **25** 023106

## SPECIAL TOPIC—Ultra short ultra intense laser plasma physics

**High-quality laser wakefield electron accelerator\***Jiang Kang-Nan<sup>1)2)</sup> Feng Ke<sup>1)</sup> Ke Lin-Tong<sup>1)3)</sup> Yu Chang-Hai<sup>1)</sup>Zhang Zhi-Jun<sup>1)</sup> Qin Zhi-Yong<sup>1)</sup> Liu Jian-Sheng<sup>1)</sup>Wang Wen-Tao<sup>1)†</sup> Li Ru-Xin<sup>1)2)‡</sup>1) (*CAS Center for Excellence in Ultra-intense Laser Science, State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)2) (*School of Physics Science and Technology, Shanghai Tech University, Shanghai 200031, China*)3) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

( Received 26 November 2020; revised manuscript received 31 December 2020 )

**Abstract**

The acceleration gradient of laser wakefield acceleration is 3–4 orders of magnitude higher than that of state-of-the-art radio-frequency accelerators, which has unique advantages in the field of electron acceleration. With the development of application fields, higher requirements are put forward for the quality of electron beams. Achieving high stability, high energy, high charge, narrow pulse width and low emittance is the direction of long-term efforts in the field of electron acceleration. This article mainly summarizes the achievements of the relevant research teams in electron acceleration from Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics in recent years. The energy of the electron beam based on the acceleration of the laser wakefield is mainly limited by the dephasing length and the laser pumping loss length. Aiming at the problem that the two stages of laser wakefield acceleration cannot be controlled independently and the plasma density is difficult to balance, a cascaded acceleration scheme where the injection stage and the acceleration stage are separated is proposed. The injection stage has a higher plasma density and the acceleration stage has a lower plasma density. The acceleration stage with lower density has a longer dephasing length, so that a higher acceleration can be obtained without affecting electron injection. Finally, the electron beam energy of the order of GeV is obtained in experiment. In order to obtain a higher-quality electron beam, a low-energy-spread electron beam is obtained experimentally by using energy chirp controlling. The six-dimensional phase space brightness, which simultaneously characterizes multiple qualities such as electron beam emittance, charge and pulse width, is introduced. It is hard, with high quality only, to achieve long-distance transmission of electron beams and to generate free electron lasers. For the development of free electron lasers, the transmission and modulation of the electron beam are equally important. Taking into account the need to further optimize the acceleration of electrons from generation to realization of active control, higher quality and higher stability, it is necessary to monitor the interaction process between laser and plasma in time to obtain parameter through diagnosis. We have designed and optimized a variety of diagnostic solutions suitable for electron acceleration in the laser wakefield to achieve single-shot measurement of electron beams at different positions, such as using Betatron radiation inversion to measure ultra-low emittance. The effect of laser multifilament on the quality of the generated electron beam is also discussed.

**Keywords:** laser wake-field acceleration, high-quality electron beam, six-dimensional phase space brightness**PACS:** 41.75.Jv, 52.38.–r**DOI:** 10.7498/aps.70.20201993

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11991072, 11875065, 11127901), the Strategic Priority Research Program (B) of Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDB16), the Natural Science Foundation of Shanghai, China (Grant Nos. 18JC1414800, 18ZR1444500), the State Key Laboratory Program of Chinese Ministry of Science and Technology, and the Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences (Grant No. Y201952).

† Corresponding author. E-mail: [wwt1980@siom.ac.cn](mailto:wwt1980@siom.ac.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [ruxinli@mail.siom.ac.cn](mailto:ruxinli@mail.siom.ac.cn)