

超短强激光脉冲驱动等离子体波加速电子方案*

盛政明¹⁾ 张杰

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

摘要 随着超短脉冲激光技术的发展,人们可以在台面尺度获得光强超过 $10^{18}\text{W}/\text{cm}^2$ 、脉宽小于100fs的超短脉冲激光.超短脉冲激光很容易把静止的电子加速到兆电子伏的能量.而更重要的是超短激光脉冲可以通过其有质动力激发大振幅的等离子体波(称为激光尾波场),后者可以在毫米空间尺度把电子加速到上百兆电子伏的能量.文章将介绍激光尾波场加速电子的物理机制和方案、这个领域的最新进展、以及目前存在的问题.

关键词 超短脉冲激光 激光尾波场 电子加速 准单能电子束

1 引言

传统的电子加速器需要接连在长达几公里中的特别加速管内注入微波才能把粒子加速到几十GeV的能量.譬如在瑞士的日内瓦, CERN的科学家正在建立世界上规模最大的粒子加速器——大型强子对撞机(LHC),为了把质子束加速到TeV量级其周长达27km;美国斯坦福大学的直线型电子加速器(SLAC)可以把电子加速到100GeV的能量,而其长度也长达3km.这是由于受到加速管壁在强微波场作用下崩溃限制,使得加速梯度在100MV/m左右已经达到极限.由于传统加速器和技术这个局限及其高昂的造价,在过去二十多年里,物理学家们一直探索新的加速粒子方案,以期望将来能在小的多得距离内把粒子加速到相当高甚至更高的能量.新型先进加速器一种设想是利用强激光来加速电子和离子.近年来,随着超短脉冲激光技术的进一步发展,人们可以获得强度 $10^{20}\text{W}/\text{cm}^2$ 的超强激光脉冲.电子在其中的振荡能达到20MeV左右.其电场强度可以按照下面的方程计算: $E_L[\text{V}/\text{cm}] = 27.4I^{1/2}[\text{W}/\text{cm}^2]$.如果光强为 $10^{20}\text{W}/\text{cm}^2$,则在焦点附近的电场强度达到 $E_L \approx 27\text{TV}/\text{m}$.但是由于这个场是个振荡的电场,一般不能在长距离加速电子.为此人们提出了一系列的加速方案,譬如质动力加速、真空拍频波加速、贝

塞尔光束加速、激光随机加速、逆自由电子激光加速、逆Cerenkov加速等.但除了后两者,这些激光直接加速目前大都仍处于理论研究.

新型先进粒子加速器一个重要的研究方向是以等离子体作为加速介质的电子等离子体波加速器^[1].这是因为等离子体本身是完全电离的准中性物质,能够承载极大的加速电场.其中的电子等离子体波是一种静电波.目前人们在实验室已经获得100GeV/m的加速梯度,超过常规加速器3—4个数量级.下面简要介绍等离子体波的激发方式、电子注入方案、电子加速有关实验等方面工作.

2 大振幅等离子体波的产生

根据等离子体波产生的方式,目前等离子体波加速器主要有^[1]:等离子体尾波场加速器、等离子体拍频波加速器、激光尾波场加速器、自调制激光尾波场加速器、互调制激光尾波场加速器.其中等离子体尾波场加速器和拍频波加速器最早在实验上被演示,这是因为所需的技术:相对论电子束(等离子体尾波场加速器)和中等功率的长脉冲激光(拍频波加速器)在以前已具备.最近十年里,由于超短脉冲激光技术的发展,激光尾波场加速器被得到更大的重视.如果激

* 国家自然科学基金杰出青年基金(10425416),国家自然科学基金(10335020),国家八六三高技术惯性约束核聚变主题和中国科学院知识创新工程项目资助

1) E-mail: zmsheg@aphy.iphy.ac.cn

光脉宽接近于等离子体波的波长一半, 等离子体波将被共振激发. 这是标准的激光尾波场. 由于这个条件比较难以达到, 人们提出了一种自调制尾波场加速器 (SM-LWFA). 自调制尾波场加速器采用较长的光脉冲 (百飞秒量级), 并接通常运行在密度较高一点的等离子体中. 同时激光的功率大于激光自聚焦的临界功率. 在2003年前大部分的激光尾波场加速实验是采用这个方案. 自调制尾波场的缺点是(1) 由于运行在较高的等离子体密度, 产生的尾波场的相速度较小, 于是电子容易离开尾波场加速相位区, 因而限制了加速距离; (2) 被调制的光脉冲结构很容易产生衍射发散; (3) 自调制尾波场是由自调制不稳定激发起来的, 它使实验结果很依赖于初始等离子体.

为克服自调制尾波场的某些缺点, 提出了互调制尾波场加速器 (XM-LFWA) 的设想^[2]. 在这个设想中用一个超短脉冲产生一个较弱的等离子体波尾波场, 然后同向随后注入一个较长的光脉冲. 通过预先生成的较弱的等离子体波对后面光脉冲的调制, 调制的光脉冲就能对较弱的等离子体波放大. 与自调制尾波场加速方案相比, 互调制尾波场方案具有以下几个优点: (1) 可以利用相对强度较低的激光脉冲; (2) 等离子体波的激发具有可控性; (3) 光脉冲的能量可以非常快而有效地转换成等离子体波能; (4) 它可以运行在较低密度的等离子体中, 因此有较长的加速距离, 以获得更高的电子能量. 此外, 两个激光脉冲的间距是比较随意的, 使其在实验比较容易实现. 在2004年台北中研院、台湾大学等科学家报道了他们在实验上初步证实了互调制尾波场加速方案^[3].

3 准单能电子束产生方案

在实际应用中所需要的粒子束必须有很好的方向性、包含足够多的粒子、以及所有粒子具有相近的能量. 在等离子体波加速器实验中, 为了使被加速电子得到非常有效的加速, 并获得相近的能量 (准单能), 它们必须处在适当的相位. 由于等离子体波破裂注入和其他常规注入法通常难以做到这点, 人们提出了几种全光学注入法.

密歇根大学的 Umstadter 等人提出了激光注入法 (LILAC)^[4]. 在这个方案中, 一个强的泵浦激光用来产生一个尾波场, 然后将另一个时间同步的光脉冲的横向注入到尾波场中, 这个注入激光脉冲的横向有质动力在尾波场方向加速一些电子, 使这些电子中的一部分其速度超过被等离子体波捕获的阈值, 然后被等离

子体波加速. 有关这方面的实验研究正在进行中.

劳伦斯伯克利实验室的 Esarey 等人提出了碰撞光脉冲注入法^[5]. 在这个方案中用两个与泵浦光脉冲同轴相向的传播的光脉冲在泵浦光激发的尾波场中相撞, 形成一个低相速度的拍频波. 这个拍频波将背景等离子体中的电子捕获, 此后把它们加速至被等离子体波捕获的能量阈值. 类似的方法是我们提出的采用交叉传播的激光脉冲相互作用, 通过激光对电子的随机加速, 将电子注入到其中一个光脉冲产生的尾波场中, 使其获得进一步加速^[6].

Moore 等人提出了激光电离加有质动力加速的全光学注入方案 (LIPA)^[7]. 与前面提到的 LILAC 方案相比, 这个方案设想将注入光脉冲在尾波场之前的中性气体中, 与泵浦光脉冲的路径交叉. 电离产生的电子以及随后的有质动力加速提供了注入电子.

当激光强度达到一定大小, 激发的等离子体波的振幅可以达到波破裂阈值. Pukhov 和 Meyer-ter-Vehn 通过数值模拟发现^[8], 当激光强度足够大, 同时激光的脉宽足够短 (通常是几个激光周期), 在激光脉冲后面产生一个等离子体电子被完全排空的结构, 称为等离子体密度空泡, 它跟着激光脉冲向前传播. 在空泡后面是完全破裂的等离子体波. 部分电子被空泡内的电场所捕获, 并被加速. 数值模拟表明, 这种空泡加速可以产生准单能的高能电子束.

虽然人们在实验上已证实等离子体波产生的加速梯度可以超过常规大型加速器3个数量级, 但激光尾波场加速器最后能否产生实际所需要的高质量电子束仍然是个疑问. 直到2004年, 法国、美国、英国、日本等几个实验室连续报道在实验室通过激光尾波场加速获得几十乃至上百兆电子伏的准单能的高能电子束, 同时它们具有很小的发散角和相当的电荷数^[9]. 这些最新的结果打消了人们对激光尾波场加速器的疑问, 引起了粒子加速器界的广泛关注. 目前已经有更多的实验室在开展类似的工作.

4 展望

由于在实验上已经观察到质量很高的准单能高能电子束, 使人们对尾波场加速器的前景充满期待. 虽然获得的电子束能量还在200MeV以下, 但这种台面尺度的加速器, 已经足以使其在很多相对低能量的应用上引起人们的兴趣, 其中包括材料科学、核生物和医学、癌症治疗、核废料处理、超短脉宽X射线产生等. 目前研究的一个重点是如何在实验上获得

稳定的准单能高质量电子束. 另一方面, 通过数值模拟和理论分析可以预期, 将几十飞秒的超短激光脉冲的功率提高到500TW, 同时将等离子体密度降低到 10^{18}cm^{-3} , 长度延伸到10mm, 就可能获得GeV能量的准单能电子束. 这也将是以后近几年内的一个重要研究方向. 在这项研究中, 等离子体通道的产生和控

制也是一个关键的问题. 从更长远的方面看, 由于电子加速的相位失谐长度和最终的能量是与等离子体密度密切相关的, 为了获得100GeV量级的电子加速, 类似常规加速器的分级加速可能是必不可少的. 这对分级之间的同步, 特别是分级之间注入电子所处的等离子体波相位控制将是非常挑战性的课题.

参考文献(References)

- 1 Tajima T, Dawson J M. Phys. Rev. Lett., 1979, **43**: 267;
Esarey E et al. IEEE Trans. Plasma Sci., 1996, **24**: 252
- 2 SHENG Z M et al. Phys. Plasmas, 2002, **9**: 3147
- 3 CHEN W T et al. Phys. Rev. Lett., 2004, **92**: 075003
- 4 Umstadter D et al. Phys. Rev. Lett., 1996, **76**: 2073
- 5 Esarey E et al. Phys. Rev. Lett., 1997, **79**: 2682
- 6 ZHANG P et al. Phys. Rev. Lett., 2003, **91**: 225001
- 7 Moore C I et al. Phys. Rev. Lett., 1999, **82**: 1688
- 8 Pukhov A, Meyer-ter-Vehn J. Appl. Phys., 2002, **B74**: 355
- 9 Geddes C G R et al. Nature (London), 2004, **431**: 538;
Faure J et al. Nature(Londn), 2004, **431**: 541; Mangles S
P D et al. Nature(Londn), 2004, **431**: 535

Schemes for Electron Acceleration by Laser-Driven Plasma Waves*

SHENG Zheng-Ming¹⁾ ZHANG Jie

(Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract With the advent of the chirped-pulse-amplification technology, one is able to obtain the ultrashort laser pulses with a focused intensity over $10^{18}\text{W}/\text{cm}^2$ and with a duration less than 100fs. Such laser pulses can accelerate electrons to relativistic energy directly. More importantly, they can drive large-amplitude plasma waves, so called the laser wakefields, which can accelerate electrons to the energy of hundreds of MeV in mm-length. In this paper, we introduce briefly various schemes of the laser wakefield accelerators, the recent progress, and the remaining challenges.

Key words ultrashort intense laser pulse, laser wakefields, electron acceleration, quasi-monoenergetic beams

*Supported by National Nature Science Foundation (10425416, 10335020), National High-Tech ICF Committee and Knowledge Innovation Program, CAS

1) E-mail: zmseng@aphy.iphy.ac.cn