

从激光加速到激光离子加速器

许天琦 吴学志 颜学庆[†]

(北京大学物理学院 北京 100871)

2021-09-15收到

[†] email: x.yan@pku.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20211003

Development and prospects of laser ion accelerators

XU Tian-Qi WU Xue-Zhi YAN Xue-Qing[†]

(School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

摘 要 高能离子束在基础研究、材料学、生物学及医学等诸多领域有着重要价值和广泛应用,其产生方法也受到了越来越多的关注。激光等离子体相互作用能够产生比常规射频加速器高三个量级的加速电场,由此可以建造占地小、成本低、峰值流强高的新型加速器。文章介绍了激光离子加速的基本物理概念及实验进展,并对激光离子加速器的工程设计及应用前景进行了简介。

关键词 激光, 等离子体, 粒子加速器

Abstract High-energy ion beams are of great value and are widely used in many fields such as basic research, materials science, biology, and medicine; for this reason, their generation methods are receiving increasing attention. Laser plasma interaction can generate an accelerating electric field three orders of magnitude higher than that of a conventional radio frequency accelerator, which allows the construction of new compact accelerators with low cost and high peak flow intensity. This paper introduces the basic physical concepts and experimental progress of laser ion acceleration, and gives an overview of the engineering design and application prospects of laser ion accelerators.

Keywords laser, plasma, particle accelerator

1 引言

高能粒子加速器自被发明以来,不仅承担着研究高能粒子物理、探究宇宙起源的重要使命,也在材料学、生物学、医学等诸多领域发挥着重要作用。常规射频加速器的发展受限于材料损伤阈值,在加速梯度无法突破 100 MV/m 的限制下,只有通过增大加速器的尺寸才能获得更高能量的粒子束,而这也意味着更大的占地面积和更高的工程造价。Tijima 与 Dawson 于 1979 年提出了基于激光等离子体相互作用的新型加速机制^[1]。随着激光技术的飞速发展,激光等离子体加速在

近二三十年时间内取得了巨大进展,其加速梯度高出常规射频加速器三个量级,意味着加速到相同能量所需的加速距离也相应降低三个量级,这也使得建造紧凑型加速器成为可能。

激光等离子体加速按照加速粒子的种类可以分为电子加速和离子加速。激光电子加速发展较早,研究也更为成熟。2019 年,劳伦斯伯克利国家实验室(LBNL)在 20 cm 的放电毛细管中通过激光激发尾波场成功将电子加速到 7.8 GeV^[2]。而激光离子加速更具挑战性,因为离子质量远大于电子,在现有的激光条件下,离子还不能直接从激光中获得能量,只能通过电子作为媒介:激光先将能量传递给电子,形成静电分离场,离子在分

离场中被加速。激光离子加速的实验研究始于2000年,经过20多年的努力,质子最高能量也已经达到了近100 MeV^[3]。

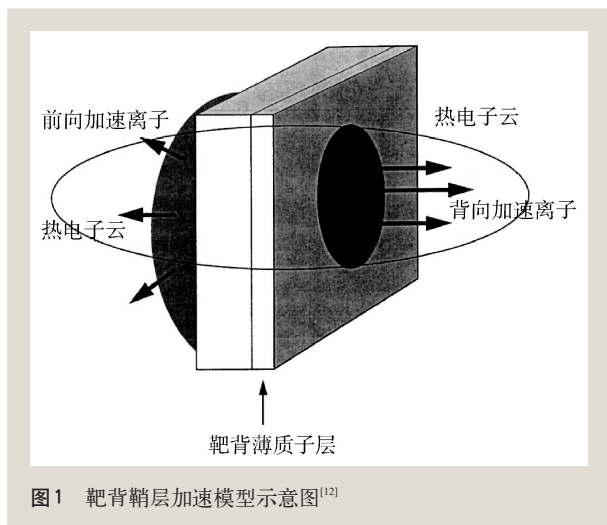
相比于传统加速器,激光驱动的离子束具有源尺寸小、脉冲短、亮度高和能谱宽等特点,在等离子体电磁场诊断^[4]、核聚变质子快点火^[5]、质子照相^[6]、癌症治疗^[7]和温稠密物质产生^[8]等方面有着广阔的应用前景。要想真正实现这些应用,激光离子加速还需向“激光离子加速器”迈进。离子能散、稳定性、可靠性、可重复性等问题都需要在实验中进一步得到解决。对于肿瘤治疗等应用,如何进一步提高激光离子束的能量是目前激光离子加速领域亟需解决的关键难题。

本文首先简要阐述了超短超强激光驱动离子加速的物理机制和图像,并介绍了目前激光离子加速的实验进展。对于如何实现从“加速”到“加速器”的转变,文章以首台1%能散激光离子加速器装置为例,介绍了激光离子加速器的相关技术和进展。最后对激光离子加速器的发展以及应用前景进行展望。

2 激光离子加速

2.1 物理机制

激光驱动离子加速是通过激光轰击靶材来实现的。通常使用的激光是超短超强激光,“超强”体现在其功率密度一般大于 10^{18} W/cm²,相当于



将太阳照射到地球的光全部聚焦在一个小小的指甲盖上。“超短”则是指脉宽通常只有几十飞秒(10^{-15} s)到几个皮秒(10^{-12} s)。而常用靶材是塑料、金属和类金刚石等固体材料,其厚度通常只有几十纳米到几个微米。因此激光离子加速是在微米—飞秒时空尺度将离子加速到接近光速的高能量密度物理过程。

激光离子加速的研究离不开激光技术的飞速发展。自从1960年世界上第一台红宝石激光器诞生以来^[9],激光凭借其良好的单色性和方向性而得到了广泛的应用,人们也致力于不断提高激光的峰值功率以及总能量。1985年,Mourou等人提出了啁啾脉冲放大技术(CPA)^[10],将激光的光强提高了6个量级,并将激光脉宽压缩到了飞秒量级。目前的超短超强激光都是基于CPA技术产生的,最强的激光所具有的功率密度已经超过 10^{22} W/cm²^[11]。在实际的应用中,我们希望超强激光的功率可以在很短的时间内从零达到峰值,但是受限于组成高功率激光器的光学元件的参数,仍然有光在主脉冲之前出射,这部分光被称为预脉冲,而预脉冲与主脉冲功率密度之比称为激光的对比度。激光的对比度是衡量激光品质的重要参数,预脉冲可能影响离子加速中的物理过程,进而影响离子束的截止能量和品质。

构成靶体的原子是原子核和核外电子在库仑力的作用下结合成的。在超强电场的作用下,部分核外电子会脱离原子核的束缚而成为自由电子,原子被剥离核外电子后成为带电离子。这样的由大量处于非束缚态的带电粒子(包括离子和电子)组成的多粒子体系被称为等离子体。当激光的功率密度大于 10^{14} W/cm²时,激光的电场能够将绝大多数物质瞬间电离为等离子体。驱动离子加速的高功率激光照射到靶表面,强大的电场将靶电离为等离子体,因此离子加速的过程实际上就是激光与等离子体相互作用的过程。

根据实验中激光和靶参数的不同,激光加速离子的物理过程也随之发生改变,因此加速机制也不同。目前最常见的两种加速机制是靶背鞘层加速(target normal sheath acceleration, TNSA)^[12, 13]和光压加速(radiation pressure accel-

ation, RPA)^[14, 15]。

靶背鞘层加速作为最早被提出,也是最成熟的加速机制,已经被很多实验结果所证实。TNSA 加速机制的模型如图 1 所示,其物理图像为:激光入射到固体靶的前表面产生超热电子,其中部分高能电子穿过靶体到达靶后,建立一个沿靶背法向的鞘层电场。该静电场可以直接将靶后表面的原子电离,并对离子进行加速。目前 TNSA 的理论已相对成熟,实验操作中也能较好地实现,但是其不足之处在于实验中得到的离子能谱通常具有指数下降特征,离子能量和单能性等品质都与实际应用有一定差距,且离子截止能量正比于激光光强的二分之一次方,能量转化效率较低。

人们为了实现更加高效的离子加速,提出了激光驱动超薄靶的光压加速模型,而激光技术的发展及制靶工艺的不断提

高也使得实验验证成为可能。光压加速发生在飞秒激光与纳米靶相互作用的过程中,RPA 加速机制的模型如图 2 所示,激光的有质动力将电子压缩并推出,形成电荷分离场并加速离子,被推出的电子和离子形成准电中性的等离子体片作为整体的“等离子体飞镜”(plasma mirror)完全反射激光并被推动加速。理论预言通过 RPA 机制加速得到的离子具有较好的单能性,且截止能量正比于激光光强。但是想要得到理论预言的实验结果,需要激光具有足够大的焦斑以及足够高的对比度,这对实验条件及实验操作提出了相当高的要求。

为了能够在现有实验条件下实现光压加速,并进一步提高离子束流品质,颜学庆等人^[15]通过理论分析和数值模拟计算,发现光压加速机制中存在一种稳相区域:利用中等强度的圆偏振激光照射纳米靶,得到具有下降沿分布的静电场,能够对离子同时进行加速和聚束,理论上可以有效降低离子束流能散。图 3 为在典型的稳相加速区域中,电场的空间分布及电子和质子的空间密

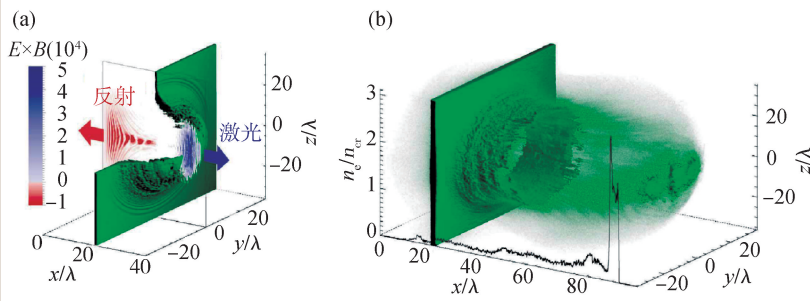


图 2 光压加速模型示意图^[14]

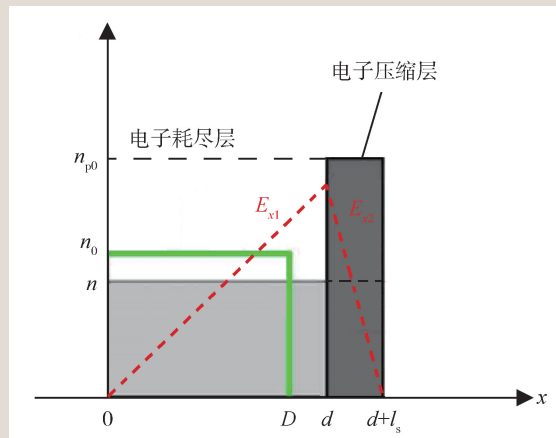


图 3 稳相光压加速模型^[15]

度分布。

稳相光压加速区域要求激光光强与靶的归一化面密度相当,即

$$a(1+\eta)^{1/2} \sim (n_0/n_c)(D/\lambda_L),$$

其中 a 为激光归一化电场强度, η 为激光反射系数, n_0 为等离子体密度, n_c 为等离子体临界密度, D 为靶的厚度。此时靶内的电子并未完全被激光光压推出靶外,而是与静电力达到平衡,固体靶被分为缺少电子的电子耗尽层以及电子压缩层两部分。处于电子压缩层的离子感受到负梯度的静电场,距离靶体较远的离子感受到的静电场小,而距离靶体较近的离子感受到的静电场大,离子束在加速的同时在纵向还有聚束的效果,得到的能谱呈现较好的单能性。

2.2 实验进展

2000 年,英国 Blackett 实验室 E. L. Clark^[16]和美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室 R. A. Snavely^[17]相

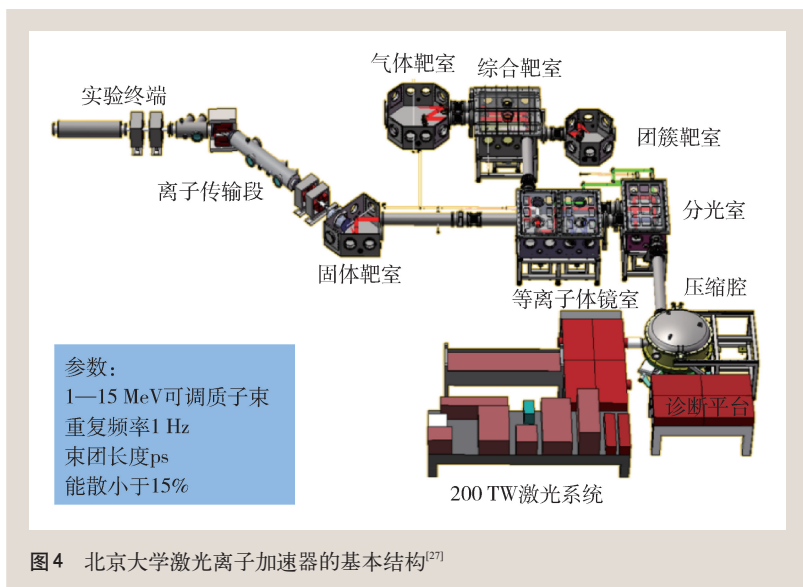


图4 北京大学激光离子加速器的基本结构^[27]

继使用激光轰击固体靶，在实验中首次观察到几十 MeV 的高能质子束，引发了激光驱动离子束的研究热潮。

早期实验探索的重点在于得到较为清晰的加速机制物理图像。E. L. Clark 等人将强度 $5 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$ 的激光入射到 $125 \mu\text{m}$ 的 Al 靶上，得到了能量大于 2 MeV 的质子束。同年 R. A. Snavely 等人使用能量为 48 J、功率为 1 PW 和激光强度为 $3 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$ 的激光轰击 $100 \mu\text{m}$ 的 CH 靶，得到截止能量高达 58 MeV、能谱呈麦克斯韦分布的质子束。

S. C. Wilks^[12] 等人，A. J. Mackinnon^[18] 以及 J. Fuchs^[19] 等人在实验中进一步验证了高能粒子主要来源于靶的后表面，靶背鞘层加速机制的物理图像也得到了普遍认可。

为了进一步提高离子束能量、改善离子束品质，各种通过改变靶的结构、靶的布局，以提高激光能量吸收效率的方案被相继被提出。目前基于 TNSA 加速机制得到的质子束的最高截止能量为 85 MeV^[20]。

光压加速因为其显著优于靶背鞘层加速的定标率而得到了广泛的关注，多个团队也成功开展了基于光压加速的离子加速实验研究。2009 年，德国 A. Henig 等人^[21] 使用能量 0.7 J、功率密度为 $5 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$ ，对比度为 10^{11} W/cm^2 的圆偏振激光正入射到碳靶上，实验上首次实现了基于 RPA

的离子加速，得到的质子和 C^{6+} 的截止能量分别为 13 MeV 和 71 MeV，且 C^{6+} 离子具有准单能峰结构。

S. Kar 等人^[22] 于 2012 年使用功率密度为 $3 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$ 的亚皮秒激光照射不同厚度的多组分固体靶，得到峰值能量位于 5—10 MeV/u 的高亮度准单能质子和碳离子束。S. Steinke 等人^[23] 于 2013 年使用功率密度为 $5 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$ 的圆偏振激光轰击 10 nm 聚合材料靶，得到峰值能量 2 MeV 的准单能质子束。马文君等人^[24] 于 2019 年使用功率密度为 $5.5 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$ 的线偏振激光照射

由临界密度碳纳米管和类金刚石靶组成的双层靶，经过 TNSA 和 RPA 的级联加速，产生的碳离子束能量高达 48 MeV/u，这也是目前为止由激光驱动碳离子束的最高能量。王鹏杰等人^[25] 于 2020 年使用功率密度为 10^{22} W/cm^2 的超短超强激光轰击超薄的由 Au 和临界密度碳纳米管组成的双层靶，得到了能量为 1.2 GeV 的金离子束。目前基于激光器得到的质子束的最高能量为 94 MeV，是 2018 年 Higginson 等人^[3] 将功率密度为 $3 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$ 的线偏振光斜入射到超薄塑料靶上得到的，被加速的质子接连感受到基于 RPA 和 TNSA 的纵向电场，可以认为是在 RPA—TNSA 混合加速机制下被加速的。

3 从“加速”到“加速器”

3.1 激光离子加速系统

北京大学紧凑型激光离子加速器 (compact laser plasma accelerator, CLAPA) 的基本结构如图 4 所示。激光离子加速系统主要包括：高功率激光系统、激光品质提升系统、靶室系统、诊断系统和控制系统。高功率激光系统为整个加速器提供高功率激光脉冲；激光品质提升系统能够提高激光时域对比度并改善激光波前等光束品质；靶室系统利用超短超强激光脉冲产生并加速离子

束；诊断系统用于实现对加速中和加速后激光以及束流信息的获取；控制系统负责保证加速器高效有序运行。

激光离子加速系统200 TW激光系统基于双啁啾脉冲放大技术，以钛蓝宝石为增益介质，经过光路自准直及监控系统、等离子体镜系统和自适应光学系统提升激光脉冲的对比度和聚焦性能后，可产生峰值功率200 TW、能量5 J、脉宽25 fs的主脉冲和能量及脉宽连续可调的预脉冲。

激光品质提升系统由光路自准直及监控系统、自适应光学系统(adaptive optics, AO)和等离子体镜系统等核心系统组成。光路自准直及激光监控主要用来实现激光脉冲从高功率激光系统稳定地传输至靶室系统；自适应光学系统通过校正由反射镜片、透镜、波片、偏振片等光学元件带来的波前畸变来进一步提升输出脉冲功率密度；等离子体镜系统通过切换减反镜的低反射率状态和等离子体的高反射状态，形成一个对激光脉冲的时域开关，从而提高脉冲对比度。

CLAPA靶室系统主要包括固体靶室、综合靶室、气体靶室和团簇靶室。固体靶室、气体靶室和团簇靶室分别为离子加速实验、电子加速实验以及超高对比度超薄靶离子加速实验提供实验环境；综合靶室主要用于基于高能电子束和离子束的其他后续实验。后续离子传输线的离子源主要由固体靶室提供，其内部主要由聚焦系统、靶体系统、焦斑监测系统和真空系统组成。

诊断系统可以探测激光和高能粒子束流的各种信息，其中离子能谱是最常用的离子诊断数据，主要包括各种离子的能量及各能量段离子数目。实验中常用的探测介质包括CR-39、辐射变色片(RCF)、image plate(IP)板、微通道板(micro channel plate, MCP)和闪烁体等；常用的探测设备包括汤姆孙谱仪、角分辨谱仪和叠层探测器等。

控制系统是加速器不可或缺的部件之一，它是加速器的大脑和神经，对整个加速器能否顺利稳定运行起着关键的作用。控制系统主要由激光系统、激光品质提升系统、靶室系统、数据存储及后处理、实验环境监测等分系统组成，也可以根据不同的应用要求扩展。

为确保加速系统的稳定性，北京大学激光离子加速器运行在恒温恒湿的洁净环境内。为了进一步减少震动干扰，主要设备固定在3 m厚的钢筋混凝土地基之上。加速器运行时，能量为1.8 J，激光强度 $8 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$ ，脉宽为30 fs的p偏振激光以 30° 角斜入射到1.2 μm 厚的塑料靶上，基于TNSA加速机制产生高能质子束，质子束经过基于四极磁透镜和分析磁铁等高流强离子束流传输和分析系统到达实验终端^[26]。在实际应用时，可以通过调节电磁铁的电流来选择和调节离子束流的中心能量，调节狭缝的宽度来控制束流的能散。目前北京大学激光离子加速器可以稳定产生并传输中心能量可变(小于10 MeV)、小于1%能散，电荷量在几到几十皮库(pC)的高能质子束，这将为激光加速器走向应用奠定重要基础。

3.2 离子束的应用

3.2.1 激光离子束在磁约束核聚变诊断方面的应用

磁约束核聚变是利用精心设计的磁场空间分布将处于热核反应状态的超高温等离子体约束在有限的体积内，受控制地发生核反应并释放能量的过程，是当前开发聚变能源最有希望的途径之一。随着磁约束核聚变不断取得重要进展，诊断芯部等离子体的静电涨落和极向磁场的重要性愈加凸显。

重离子束探针(heavy ion beam probe, HIBP)是利用重离子与等离子体相互作用引起的二次电离效应对等离子体进行诊断的技术，也是目前测量芯部等离子体的电势及涨落的唯一方法。如果用激光离子加速器替代传统的加速器来产生高能离子束，就可以克服传统加速器具有的占地空间大、建造成本高以及不易维护等困难。激光能够直接深入到真空室内壁产生一次离子，从而避免使用传统HIBP中所必需的大口径窗口。传统HIBP的探测和分析方法对脉冲短、能散宽、价态多的激光离子束不再适用，于是北京大学物理学院发展了基于激光加速的新型离子束轨道探针(LITP)诊断新方法^[28]，目前已在北京大学CLAPA装置上完成原理验证实验。

3.2.2 惯性核聚变质子快点火

惯性约束是指在高功率物质(如激光、电子束、离子束)的作用下,受惯性约束的核燃料达到点火条件并发生聚变反应释放大量能量,是实现聚变能源的另一条途径。传统的惯性约束核聚变使用多束激光直接或间接(转化为X射线)均匀辐照靶丸,靶丸表面被烧蚀向外膨胀的同时向内反冲压缩产生热斑,对激光辐照的均匀性以及靶体的球对称性要求极高。为了避开对激光及靶体的严苛要求,快点火将压缩和点火过程分开^[29],有效降低了对均匀性和对称性的要求。中等强度的长脉冲光将靶内氘氚气体压缩到高密度,再使用100 ps激光进一步压缩并钻出一个通道,最后使用超短超强激光产生1 MeV的超热电子并将能量沉积在芯区边缘的点火热斑处实现点火。如果使用激光驱动的质子束作为点火驱动源^[5],则可以进一步抑制热层与高密度主燃料层界面间严重的流体力学不稳定性,大幅降低对实验仪器和实验环境的要求。

3.2.3 激光质子束透射生物成像

质子束入射到物体上会发生衰减和散射,对其进行测量可以确定被测物体的物理性质和几何结构,这种成像方法被称为质子束透视成像,又称为质子照相。质子对密度和材料种类较为敏感,可以实现1%的密度区分度和较高的精细结构分辨。激光驱动质子束源尺寸小、发散角大、能谱连续,可以获得清晰的放大图像,且放大的倍率可控。具有连续能谱的质子束单发照射样品就能实现多能段质子照相,通过反演计算就能得到较为准确的密度与结构信息。

3.2.4 激光质子束癌症治疗

质子或重离子在介质中运动时,能量沉积会在射程的末端形成一个尖峰,这个尖峰被称为布拉格峰。伽马射线和X射线的能量沉积在皮肤下几厘米的位置达到峰值,在放射治疗肿瘤时不可避免地会对正常组织细胞造成极大损伤。而质子和重离子在刚入射到组织时能量沉积率极低,直到射程的末端才会迅速达到峰值,因此可以对肿瘤区域进行精准杀伤而避免误伤周围的正常组织。如果由高功率激光器和固体靶组成的激光质子治疗

装置产生的质子束能量能够达到200 MeV,那么在癌症治疗方面就有着重要应用前景。

2018年的诺贝尔生理学或医学奖被颁发给在癌症免疫疗法方面做出杰出贡献的美国科学家詹姆斯·艾利森和日本科学家本庶佑。免疫疗法有望成为治疗已浸润和已转移瘤的重要手段。癌细胞在受到超高流强脉冲质子束的辐照后会释放关键信号因子,如果能够对其进行解析并研究其与免疫系统的相互作用过程机理,有望最终实现对已转移癌症患者也具有有效治疗效果的基于质子放疗的“癌症疫苗”^[30]。

4 总结与展望

激光离子加速器是一个由应用驱动的、具有蓬勃生命力的研究领域,其在高能、材料、医学和光源等方面有着广阔的应用前景,在受到强烈关注的同时也在吸引着更多研究人员投身于此。自从在实验中观察到激光轰击固体靶产生的高能质子束,经过20年左右的发展,包括TNSA、RPA在内的多种加速机制被提出并被实验所验证。能够产生200 MeV质子束的激光离子加速器的建成,除了期待制靶工艺的提高以及激光器实现更高功率、更高对比度和更好的稳定性,我们也要深入理解激光与等离子体相互作用的具体过程,提出在现有激光参数和实验条件下提高离子束能量、改善离子束品质的新方案。

参考文献

- [1] Tajima T, Dawson J M. Phys. Rev. Lett., 1979, 43:4
- [2] Gonsalves A J, Nakamura K, Daniels J *et al.* Phys. Rev. Lett., 2019, 122:8
- [3] Higginson A, Gray R J, King M *et al.* Nat. Commun., 2018, 9:1
- [4] Borghesi M, Campbell D, Schiavi A *et al.* Physics of Plasmas, 2002, 9:5
- [5] Roth M, Cowan T, Key M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2001, 86:3
- [6] Faenov A Y, Pikuz T, Fukuda Y *et al.* Appl. Phys. Lett., 2009, 95:10
- [7] Malka V, Fritzler S, Lefebvre E *et al.* Medical Physics, 2004, 31:6

- [8] Patel P, Mackinnon A, Key M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2003, 91:12
- [9] Maiman T. Nature, 1960, 187:4736
- [10] Strickland D, Mourou G. Optics Communications, 1985, 55:6
- [11] Danson C N, Haefner C, Bromage J *et al.* High Power Laser Science and Engineering, 2019, 7:E54
- [12] Wilks S C, Langdon A B, Cowan T E *et al.* Physics of Plasmas, 2001, 8:2
- [13] Hatchett S P, Brown C G, Cowan T E *et al.* Physics of Plasmas, 2000, 7:5
- [14] Esirkepov T, Borghesi M, Bulanov S V *et al.* Phys. Rev. Lett., 2004, 92:17
- [15] Yan X Q, Lin C, Sheng Z M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2008, 100:13
- [16] Clark E L, Krushelnick K, Zepf M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2000, 85:8
- [17] Snively R A, Key M H, Hatchett S P *et al.* Phys. Rev. Lett., 2000, 85:14
- [18] Mackinnon A, Borghesi M, Hatchett S *et al.* Phys. Rev. Lett., 2001, 86:9
- [19] Fuchs J, Antici P, d'Humières E *et al.* Nature Physics, 2005, 2:1
- [20] Wagner F, Deppert O, Brabetz C *et al.* Phys. Rev. Lett., 2016, 116:20
- [21] Henig A, Steinke S, Schnürer M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2009, 103:24
- [22] Kar S, Kakolee K F, Qiao B *et al.* Phys. Rev. Lett., 2012, 109:18
- [23] Steinke S, Hilz P, Schnürer M *et al.* Physical Review Special Topics: Accelerators and Beams, 2013, 16:1
- [24] Ma W J, Kim I J, Yu J Q *et al.* Phys. Rev. Lett., 2019, 122:1
- [25] Wang P, Gong Z, Lee S G *et al.* Phys. Rev. X, 2021, 11:2
- [26] Zhu J G, Wu M J, Liao Q *et al.* Physical Review Accelerators and Beams, 2019, 22:6
- [27] 耿易星. 超短超强激光离子加速实验研究. 北京大学博士学位论文. 2017. p14
- [28] Yang X, Xiao C, Chen Y *et al.* Rev. Sci. Instrum., 2016, 87:11
- [29] Tabak M, Hammer J, Glinsky M E *et al.* Physics of Plasmas, 1994, 1:5
- [30] Goto T. Vaccines, 2019, 7:3



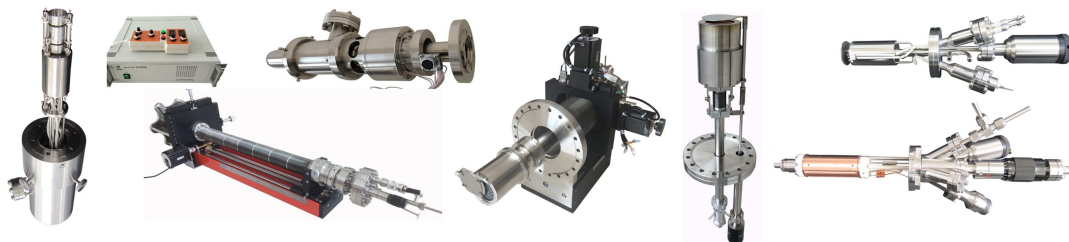
大连齐维科技发展有限公司

地址: 大连高新园区龙头工业园龙天路27号

电话: 0411-8628-6788 传真: 0411-8628-5677

E-mail: info@chi-vac.com HP: <http://www.chi-vac.com>

表面处理和薄膜生长产品: 氩离子枪、RHEED、磁控溅射靶、束源炉、电子轰击蒸发源、样品台。



超高真空腔室和薄膜生长设备: PLD系统、磁控溅射系统、分子束外延系统、热蒸发镀膜装置。

