



## 北京大学物理百年华诞纪念专刊·评述

## 北京大学超小型激光加速器系统研究进展

尚勇, 朱昆\*, 林晨, 卢海洋, 邹宇斌, 赵研英, 寿寅任, 曹超, 赵栓, 耿易新, 祝娇, 符合振, 王洪勇, 陆元荣, 袁忠喜, 郭之虞, 陈佳洱, 颜学庆\*

北京大学核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871

\*联系人: 朱昆, E-mail: zhukun@pku.edu.cn; 颜学庆, E-mail: x.yan@pku.edu.cn

收稿日期: 2013-06-25; 接受日期: 2013-07-29

国家重点基础研究发展计划(编号: 2013CBA01502)、国家自然科学基金(批准号: 11025523, 10935002, 10835003)和国家重大科学仪器设备开发专项(编号: 2012YQ030142)资助项目

**摘要** 超强激光与等离子体相互作用可以获得高于传统加速器三个数量级以上的加速电场梯度, 更加有效地加速离子, 从而能够显著缩小加速器的体积和造价。鞘层加速(TNSA)和光压稳相加速(RPA)是目前研究得最多的两种主要激光加速机制。与鞘层加速相比, 光压稳相加速的加速效率和离子能量更高、单能性更好。在提出光压稳相加速原理的基础上, 北京大学正在建造一台基于该原理的超小型激光加速器系统。本文将介绍北京大学在激光加速研究方面的进展和激光加速器系统的研制情况, 包括理论模拟、前期准备实验、自支撑纳米靶的制备以及离子输运线的初步设计。

**关键词** 激光加速, 光压稳相加速, 自支撑纳米靶

**PACS:** 41.75.Jv, 52.38.Kd, 52.59.-f, 41.85.Lc

**doi:** 10.1360/132013-306

传统加速器由于加速电场梯度的局限性, 继续发展受到了极大的制约。在过去几十年内, 物理学家一直在探索新的粒子加速原理。激光等离子体加速是利用激光与等离子体相互作用产生的电场来加速带电离子, 是一种新型的加速方法。1985年啁啾放大技术的提出<sup>[1]</sup>, 使超短超强激光技术获得了很大的发展, 激光的聚焦光强可以超过  $10^{18}$  W/cm<sup>2</sup>。当超强激光与等离子体相互作用时, 由于等离子体本身是一个电离的状态, 不存在击穿等问题, 所以产生的加速电场梯度可以比传统加速器高出千倍以上, 超过  $10^{11}$  V/m, 加速器尺寸相应地减小千倍以上。激光加速器

在实现紧凑型超高能离子加速方面有广阔的前景, 是下一代新型加速器的有力候选者之一。

根据靶结构的不同, 激光等离子体加速存在多种不同的加速机制, 激光鞘层加速(TNSA)<sup>[2]</sup>和光压稳相加速(RPA)<sup>[3]</sup>是其中主要的两种加速机制。但是激光鞘层加速产生的离子束流强低, 散角大, 能散接近 100%。2008年, 我们发现在光压稳相加速过程中, 当激光聚焦光强和激光靶面密度满足一定条件时, 在激光有质动力作用下形成的静电场不仅可以加速离子, 而且还可以对离子束进行纵向聚焦, 同时, 质子束在纵向相空间中出现了明显的相位振荡<sup>[4]</sup>。相比

**引用格式:** 尚勇, 朱昆, 林晨, 等. 北京大学超小型激光加速器系统研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43: 1282-1287  
Shang Y, Zhu K, Lin C, et al. Progress of compact laser plasma accelerator in Peking University (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2013, 43: 1282-1287, doi: 10.1360/132013-306

激光鞘层加速, 光压稳相加速可以大幅度提高离子束的能量、束流品质和束流强度. 理论研究表明, 在  $10^{21} \text{ W/cm}^2$  聚焦光强下, 可以产生 100 MeV–1 GeV 的准单能质子束, 其品质可以与常规直线加速器相比拟. 在此基础上我们提出了多种复合型加速机制以获得高能量、高品质质子束, 并且在理论模拟中得到了验证<sup>[5,6]</sup>.

目前, 北京大学正在研制一套超小型激光等离子体加速器系统. 该系统基于光压稳相加速原理, 并结合了多种复合型加速机制, 主要由激光器, 靶室, 束流传输系统及实验终端组成, 如图 1 所示. 该系统可产生具有高时间(皮秒级)、高空间分辨(微米级)的 1–30 MeV 高品质质子束. 北京大学将在这个加速器平台上开展激光等离子体加速机制、超短脉冲强流束的传输、新型靶结构的制备等基础研究以及激光加速器在核医学、空间辐射环境模拟、惯性约束聚变、国际热核聚变堆和高能量密度物理等领域的应用研究, 本文将对超小型激光等离子体加速器系统的研制情况进行介绍.

## 1 激光等离子体加速理论模拟

现有的激光加速理论和实验主要采用线偏振激光, 当采用圆偏振光激光进行加速时, 如果激光聚焦光强和固体面密度满足一定条件, 在激光有质动力作用下形成的静电场不仅可以加速离子, 而且还可以对束流进行纵向聚束. 同时, 离子束在纵向相空间

中出现了明显的相位振荡, 与直线加速器中的稳相加速过程十分类似, 即激光光压稳相加速.

为了从物理本质上解释这一新的加速机制, 我们针对光压稳相加速过程建立了一维模型并采用微分方程来描述并且求解离子的加速和聚束过程<sup>[4]</sup>. 光压稳相加速的模拟计算表明, 在现有激光强度条件下(聚焦光强  $< 10^{20} \text{ W/cm}^2$ ), 必须采用纳米量级的超薄靶<sup>[5]</sup>才能够实现稳相加速. 为了防止激光预脉冲在主脉冲到来之前击穿纳米靶, 要求激光的 ps 对比度在  $10^{10}$  以上. 进一步的理论研究与相关数值模拟表明, 根据能量定标率, 在  $10^{21} \text{ W/cm}^2$  聚焦光强下, 能够产生 100 MeV 的准单能质子束. 为了进一步提高激光与离子束的转换效率, 我们提出了利用临界密度等离子体透镜实现激光整形的方法<sup>[6]</sup>. 激光脉冲在穿过微米尺度的等离子体透镜时, 横向自聚焦, 纵向压缩和预脉冲吸收净化将会同时发生, 激光的品质和质子束的能量均会获得大幅提升(图 2). 等离子体透镜可以通过固体锥管来实现. 模拟显示, 如果将锥管与 DLC 靶体结合在一起, 在光压稳相加速机制下, 加速效率和质子束最高能量将提高三倍<sup>[7]</sup>.

## 2 纳米靶的制备

在光压稳相加速机制下, 超薄靶的厚度为 5–50 nm, 且需要能够自支撑. 因为离子能量对于靶厚度较为敏感, 所以要精确控制薄膜厚度. 同时, 自支撑薄膜还要求无缺陷、均匀、平坦、纯净、大面积、低应力等. 因此, 我们选取类金刚石薄膜做靶材. 类金刚石(DLC)膜是一种无定形碳薄膜<sup>[8]</sup>, 具有高硬度(根据工艺的不同其硬度在 2–30 GPa), 低摩擦系数( $< 0.3$ ), 很好的化学惰性及特殊的红外光透过特性.

在自支撑薄膜靶的制备中, 我们采用的是过滤阴极真空弧(FCVA)<sup>[9]</sup>的方法制备 DLC 膜(图 3), 然后利用脱膜剂方式获得自支撑薄膜(图 4). 整个流程分为制膜、脱膜、打捞三个步骤. 在制膜过程, 我们选用 p(100)抛光硅片作为基底, 首先在基底上采用电阻蒸发镀膜的方法沉积 NaCl 膜作为基底; 随后通过高压电弧使石墨阴极表面离子化, 在 NaCl 膜上沉积 DLC 膜; 然后将制成的单元放入去离子水中采用漂浮法进行脱膜; 最终使用多孔打捞板进行打捞、干燥后获得自支撑薄膜.

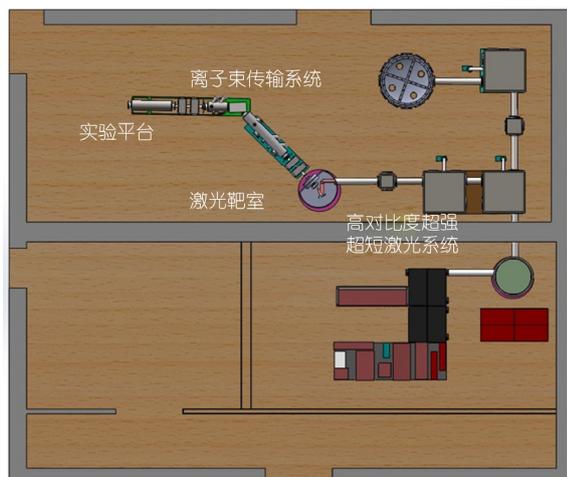


图 1 超小型激光离子加速器系统示意图

Figure 1 Schematic diagram of subminiature laser accelerator.

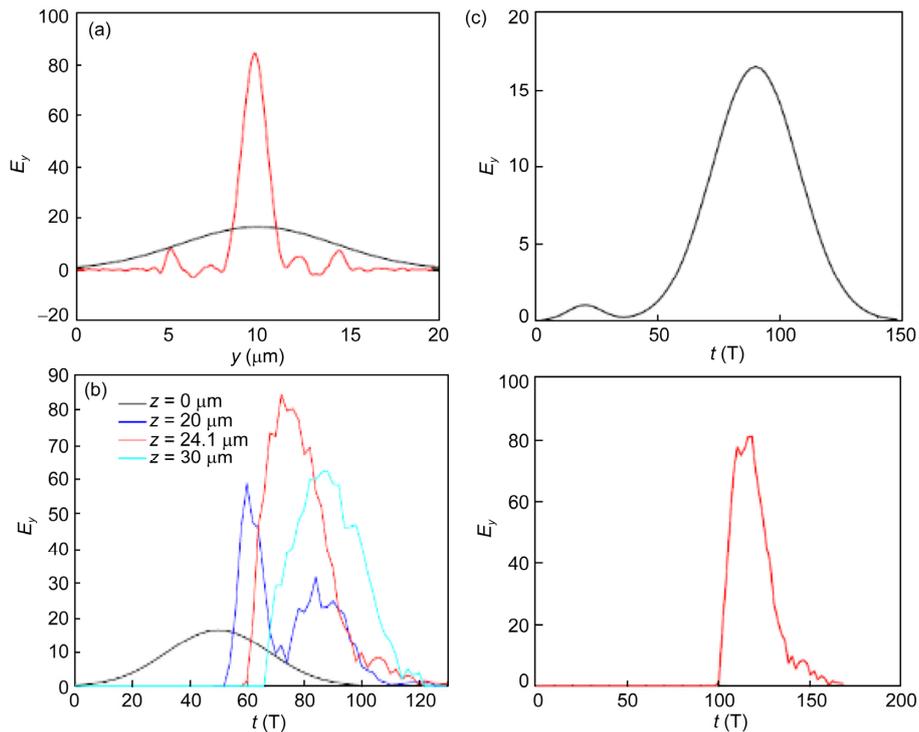


图 2 激光整形示意图

(a) 横向自聚焦; (b) 纵向压缩; (c) 预脉冲吸收净化

Figure 2 Schematic diagram of laser shaping. (a) Transverse pulse self-focusing; (b) longitudinal pulse compression; (c) absorbing of laser prepulse.

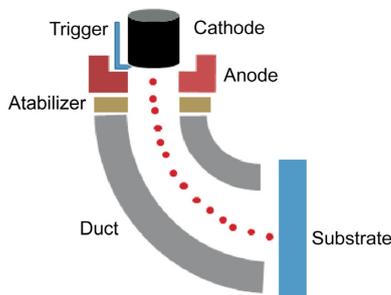


图 3 FCVA 原理简图

Figure 3 Illustration of FCVA system.

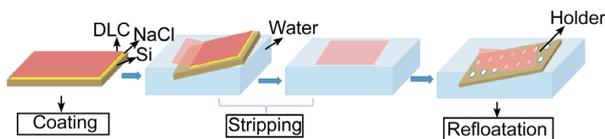


图 4 超薄靶的制备过程

Figure 4 F process of ultra-thin target.

通过这种方法制备 DLC 膜, 不仅成膜均匀, 质量好, 而且可以通过加基片偏压控制沉积到基片的离子的能量, 调节薄膜中 sp<sup>3</sup> 键含量, 控制成膜的各种性能。

同时, 通过控制起弧的脉冲数, 薄膜的厚度可以精确控制。

通过上述方式, 我们成功地制备了超薄自支撑类金刚石薄膜, 在孔径为 1 mm 的打捞板上, 能够实现自支撑的厚度范围为 5–50 nm<sup>[10]</sup>。利用拉曼光谱仪及原子力显微镜等仪器, 测量了薄膜的结构、表面粗糙度等关键参数。目前已经通过实验初步证实了所制备的薄膜可以用于激光加速实验。薄膜性能良好, 可以承受转移、抽真空等过程中的冲击, 并且通过多孔自支撑可以实现多发打靶。这些研究为进一步开展激光加速的实验与理论研究奠定了基础。

### 3 前期准备实验

2009 年北京大学联合德国马普所进行了世界上首次圆偏振激光轰击类金刚石碳纳米靶的光压稳相加速实验。激光参数如下: 聚焦光强  $5 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$ , ps 对比度在  $10^{10}$ , 激光脉冲长度 45 fs, 焦斑直径 3 μm。激光靶采用类金刚石超薄靶, 厚度为 2.9–40 nm, 密度为 2.7 g/cm<sup>3</sup>。在实验中观测到了 3 MeV/U 的准

单能碳离子能峰(能散度约±15%)和 10 MeV 的质子束<sup>[11]</sup>, 证实了该方法可以大幅度提高质子束的能量、束流品质和束流强度. 实验结果如图 5 所示.

之后, 我们和合作者在 Trident 激光器上(聚焦光强  $2 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$ , 激光脉冲长度 550 fs, 焦斑直径 10  $\mu\text{m}$ )再次进行了激光轰击纳米靶的离子加速实验. 在实验中测试了一系列不同厚度的类金刚石薄靶, 并进行了圆偏振和线偏振激光的对比. 当激光和靶的参数在  $1/3 < \sigma/\alpha_D < 3$  ( $\sigma/\alpha_D$  是归一化面密度与归一化电场矢量的比值)范围内, 能够观测到质子能峰(能量 20–40 MeV). 特别是在靶厚 42 nm 的情况下, 可以产生能散度为±15%, 能量为 30 MeV 的准单能质子束<sup>[12,13]</sup>.

#### 4 离子运输线的初步设计

激光加速器产生的质子束具有: 初始束斑小、发散角大、流强高、能散大等特点<sup>[14]</sup>. 激光加速器产生的质子束脉宽仅为几十皮秒, 脉冲流强能够达到安

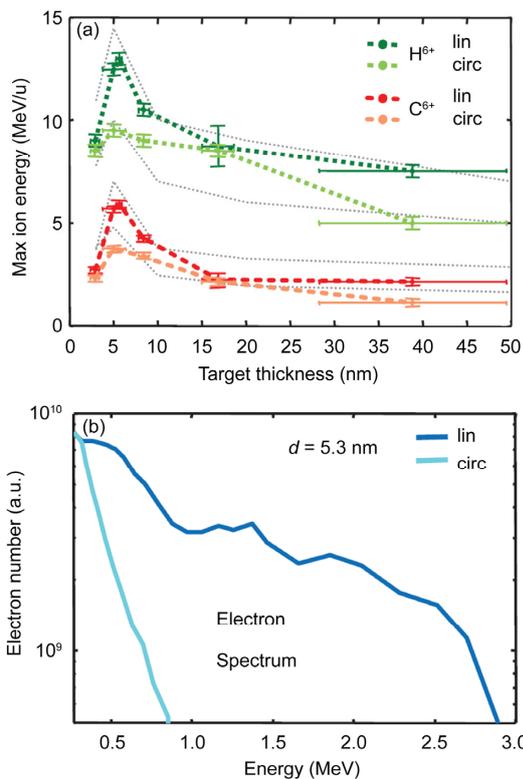


图 5 实验结果  
Figure 5 Experiment result.

培量级, 而且离子束在激光靶后的发散角非常大, 这些都会导致离子束在传输时的包络很大, 传输效率低下. 而且离子束的初始束斑与激光焦斑尺寸相等, 仅为几个微米, 同时具有较大的能散, 在传输过程中将会造成严重的像差. 因此, 激光加速器产生的离子束很难传输较远的距离并同时进行精细的分析, 对应用造成了很大的困难.

为了解决以上这些问题, 我们设计了一条激光加速器离子运输线(图 6), 利用常规加速器离子传输元件(电磁四极透镜和偏转磁铁)对离子束进行运输以及优化. 将离子束运输至实验平台的同时, 实现离子束的能量(1–30 MeV)连续可调、流强(0–10<sup>8</sup> 质子/脉冲)、能散±2%以内, 能够满足不同的实验需求.

整条束线分为两部分: 收集段、分析段. 在收集段利用四极透镜对质子束进行聚焦收集, 并同时利用质子束在透镜作用下的色散效应, 结合狭缝对质子束进行初步筛选, 将杂质离子尽可能多地剔除, 并且初步降低质子束的能散. 至此, 我们将得到类似于常规加速器产生的高能质子束. 在分析段, 利用偏转磁铁对质子束进行精细分析, 彻底剔除杂质离子, 同时控制质子束能散. 最后, 利用四极透镜调整质子束的束腰尺寸及位置, 在不同的实验靶上得到符合要求的离子束. 利用 Trace-3D 程序对质子束的传输进行模拟, 质子束参数为: 能量 15 MeV, 能散±1%, 流强  $1 \times 10^8$  质子/束团, 初始发散角±50 mrad, 脉宽 20 ps, 频率 100 Hz. 结果如图 7 所示.

#### 5 总结

激光等离子体加速器方兴未艾, 相关的加速物理机制和应用研究尚不断的探索中. 利用激光加速原理建成实际可用的加速器系统是一个复杂的工

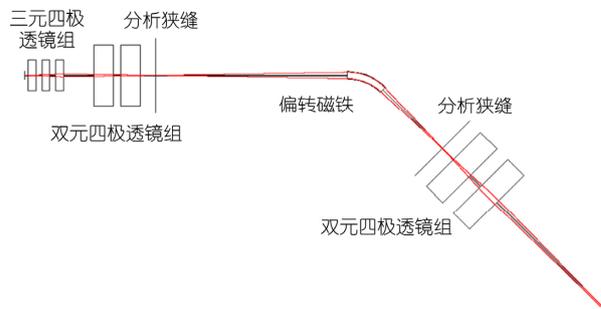


图 6 离子运输线示意图  
Figure 6 Schematic diagram of beam line.

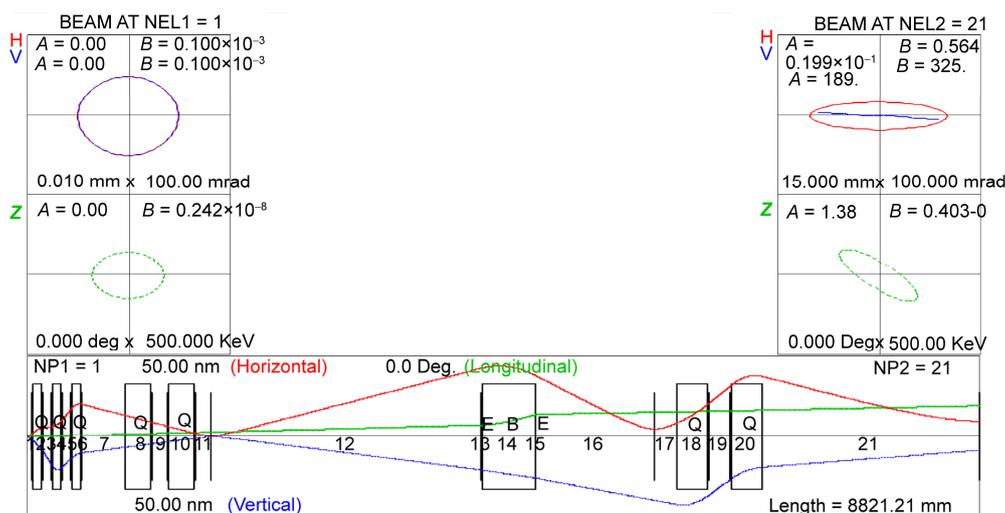


图 7 质子束传输模拟结果  
Figure 7 Simulation result of proton beam transport.

程问题。我们期望通过北大的超小型激光加速器系统的建设, 发展新的理论, 总结工程经验, 以此带动

和促进高时间、空间分辨率的超小型激光加速器在我国的发展和运用。

参考文献

- 1 Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses. *Opt Commun*, 1985, 56: 219-221
- 2 Snavely R A, Key M H, Hatchett S P, et al. Intense high-energy proton beams from petawatt-laser irradiation of solids. *Phys Rev Lett*, 2000, 85: 2945-2948
- 3 Yan X Q, Wu H C, Sheng Z M, et al. Self-organizing gev, nanocoulomb, collimated proton beam from laser foil interaction at  $7 \times 10^{21}$  W/cm<sup>2</sup>. *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 135001
- 4 Yan X Q, Lin C, Sheng Z M, et al. Generating high-current monoenergetic proton beams by a circularly polarized laser pulse in the phase-stable acceleration regime. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 135003
- 5 Wang H Y, Yan X Q, Chen J E, et al. Efficient and stable proton acceleration by irradiating a two-layer target with a linearly polarized laser pulse. *Phys Plasmas*, 2013, 20: 013101
- 6 Wang H Y, Lin C, Sheng Z M, et al. Laser shaping of a relativistic intense, short gaussian pulse by a plasma lens. *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 265002
- 7 Wang H Y, Lin C, Zheng F L, et al. High-quality proton bunch from laser interaction with a gas-filled cone target. *Phys Plasmas*, 2011, 18: 093105
- 8 Robertson J. Diamond-like amorphous carbon. *Mater Sci Eng R*, 2002, 37: 129-281
- 9 Brown G I. Cathodic arc deposition of films. *Annu Rev Mater Sci*, 1998, 28: 243-269
- 10 Zhu J, Fu H Z, Lin C, et al. Preparation of ultra-thin DLC target for laser ion acceleration (in Chinese). *High Power Laser Particle Beams*, 2013, 25: 1723-1726 [祝娇, 符合振, 林晨, 等. 激光加速实验超薄类金刚石碳靶的制备. *强激光与粒子束*, 2013, 25: 1723-1726]
- 11 Henig A, Steinke S, Schnurer M, et al. Radiation-pressure acceleration of ion beams driven by circularly polarized laser pulses. *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 245003
- 12 Jung D. Ion Acceleration from Relativistic Laser Nano-Target Interaction. Dissertation for Doctoral Degree. Munich: Ludwig Maxwillian University, 2012
- 13 Jung D, Yin L, Albright B J, et al. Monoenergetic ion beam generation by driving ion solitary waves with circularly polarized laser light. *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 115002
- 14 Hofmann I, Meyer-ter-Vehn J, Yan X Q, et al. Collection and focusing of laser accelerated ion beams for therapy applications. *Phys Rev ST Accel Beams*, 2011, 14: 031304

## Progress of compact laser plasma accelerator in Peking University

SHANG Yong, ZHU Kun<sup>\*</sup>, LIN Chen, LU HaiYang, ZOU YuBing, ZHAO YanYing, SHOU YinRen, CAO Chao, ZHAO Shuan, GENG YiXin, ZHU Jiao, FU HeZhen, WANG HongYong, LU YuanRong, YUAN ZhongXi, GUO ZhiYu, CHEN JiaEr & YAN XueQing<sup>\*</sup>

*State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China*

When ultra short and intense laser interacts with plasma, the accelerating field gradient can be three order of magnitude higher than the conventional accelerator, which can accelerate the ion more efficiently. So the accelerator scale and cost can be reduced greatly. Among the various acceleration mechanisms, target normal sheath acceleration (TNSA) and radiation pressure acceleration (RPA) are the two main mechanisms widely studied. The RPA mechanism can produce energetic ion with higher energy, narrower energy spectrum and higher acceleration efficiency than TNSA. Peking University proposed RPA mechanism in phase stable regime and is building a Compact laser plasma accelerator (CLAPA) based on this mechanism. This paper presents the progress of laser acceleration research and the development of laser accelerator including theoretical simulation, proof of principle experiments, self-supporting ultra-thin target fabrication and preliminary design of beam line.

**laser accelerate, radiation pressure acceleration (RPA), self-supporting ultra-thin target**

**PACS:** 41.75.Jv, 52.38.Kd, 52.59.-f, 41.85.Lc

**doi:** 10.1360/132013-306