

文章编号: 0258-7025(2009)06-1416-04

# 等离子体初始温度对强激光与等离子体相互作用中的高能质子产生的影响

宾建辉 雷安乐 余 玮

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 用二维 particle-in-cell (PIC) 粒子模拟程序研究了等离子体初始温度对强激光与物质相互作用过程中高能质子产生的影响。观察到不同的等离子体初始温度会影响靶前激波的形成时间, 进而影响质子产额。数值模拟显示当等离子体初始温度适度增大时可以得到更高的质子产额。

**关键词** 激光等离子体; 高能质子; 粒子模拟; 等离子体温度; 激波

**中图分类号** O53 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093606.1416

## Influence of Initial Plasma Temperature on Energetic Proton Generation From Laser-Plasma Interactions

Bin Jianhui Lei Anle Yu Wei

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** The influence of initial plasma temperature on energetic proton generation from the intense laser plasma interactions is studied by using two dimensional particle-in-cell simulation. It is found that the time required for the shock formation can be affected by the initial plasma temperature, which influences the energetic proton generation in the shock. Simulations show that high proton yield can be obtained by increasing the initial plasma temperature moderately.

**Key words** laser plasma; energetic proton; particle-in-cell simulation; plasma temperature; shock wave

### 1 引 言

啁啾脉冲激光技术的出现, 使得激光的功率密度达  $10^{21}$  W/cm<sup>2</sup>, 甚至更高成为现实。超强超短激光与等离子体相互作用时产生的高能质子束具有能量高、束流强度大、脉宽窄和方向性好等特点, 在等离子体成像诊断技术、温热稠密物质产生、质子医学治疗、快点火激光核聚变等方面<sup>[1~4]</sup> 有广泛的应用前景。强激光与等离子体相互作用产生高能质子束有多种机制。强激光脉冲与等离子体靶相互作用时通过真空加热、共振吸收、有质动力  $J \times B$  加速等机制在靶前表面产生高能电子, 高能电子随后输运到靶背表面在靶背形成准静态电场。该电场进而对靶背表面被电离的离子进行加速。在所有离子中, 质

子的荷质比最大, 所以质子被优先加速。这种加速机制称为靶背法向鞘层加速机制<sup>[5~7]</sup>。同时在靶前, 线偏振激光脉冲与固体靶相互作用激发离子声波并被演化为静电激波, 静电激波将靶中的离子反射加速到激波速度的 2 倍。这种加速机制为静电激波加速离子机制<sup>[8~10]</sup>。

强激光与等离子体相互作用中产生的质子与很多因素有关, 例如等离子体初始温度会影响质子束的产生。最近 Zhang 等<sup>[11]</sup> 研究了等离子体初始温度对质子加速的影响, 他们模拟了圆偏振激光入射到等离子体的情况, 发现等离子体初始温度较低时得到更加单能的质子源, 等离子体初始温度较高时对应较高的质子能量。本文用二维 particle-in-cell

收稿日期: 2008-09-09; 收到修改稿日期: 2008-10-27

基金项目: 国家自然科学基金(10734130, 10775165, 10875158)资助项目。

作者简介: 宾建辉(1984-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光等离子体相互作用方面的研究。E-mail: binjianhui@siom.ac.cn

导师简介: 雷安乐(1968-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事等离子体物理研究工作。E-mail: lal@siom.ac.cn

(PIC) 粒子模拟程序<sup>[12]</sup>模拟了不同等离子体初始温度对线偏振激光与等离子体相互作用过程中高能质子产生的影响,观察到线偏振激光情况下等离子体初始温度较高时,产生的高能质子数目增加。并讨论了其形成机制。

## 2 模拟参数

为了讨论在线偏振激光情况下等离子体初始温度对高能质子产生的影响,采用了二维 PIC 粒子模拟程序。模拟区域为  $60 \lambda \times 20 \lambda$ , 其中在  $X$  轴方向上  $60 \lambda$ ,  $Y$  轴方向上  $20 \lambda$ , 这里  $\lambda = 1 \mu\text{m}$  为入射激光波长。激光入射方向为  $X$  轴方向, 偏振方向为  $Y$  轴方向。激光从左侧正入射到固体靶上。激光焦斑半径大小为  $2 \lambda$ , 激光脉冲的上升沿为  $2 T$ , 然后是平顶脉冲, 持续时间  $18 T$ 。这里  $T$  为激光脉冲周期。固体靶大小为  $5 \lambda \times 10 \lambda$ , 具体位置在  $X$  方向的区间  $10 \lambda \sim 15 \lambda$ ,  $Y$  方向的区间  $5 \lambda \sim 10 \lambda$ 。固体靶中含有两种离子, 完全电离的质子和电子, 质子和电子的初始温度相等, 即  $T_e = T_i$ , 分别为  $0.1 \text{ keV}$ ,  $1 \text{ keV}$  和  $5 \text{ keV}$ 。质子和电子的密度为  $10 n_c$ 。这里的  $n_c$  为等离子体临界密度。

## 3 结果和讨论

图 1 为激光入射 27 个周期后的质子能谱图。这里激光的峰值强度为  $I_0 = 1.38 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$ , 对应于归一化振幅  $a(\equiv e A / m_e c^2) = 10$ 。从图中可以看到, 随着等离子体初始温度的增加, 质子数目得到显著增加,  $5 \text{ keV}$  情况下的质子数目最大,  $1 \text{ keV}$  次之,  $0.1 \text{ keV}$  最小。图 2 为激光入射 27 个周期时刻不同等离子体初始温度情况下质子的相空间分布图。由相空间分布发现, 高能质子存在两种产生机制, 靶前静电激波加速机制和靶后法向鞘层加速机制, 其中由靶前静电激波加速产生的高能质子的最大速度约为  $0.2 c$ , 是靶后加速的高能质子的最大速度(约为  $0.1 c$ )的 2 倍, 由图 2 中也可以看到, 靶前加速的高能质子的数目明显高于靶后法向鞘层加速产生的高能质子。靶前加速的高能质子的速度和数目都比靶后加速的高能质子要高, 这表明在 27 个激光周期时刻下主要加速机制为靶前静电激波加速。另外, 从图 1 中可以看到, 不同等离子体初始温度条件下的质子能谱的主要部分是一个平坦的曲线部分, 这种能谱曲线形状也与实验上静电激波加速产生的质子能谱的结果相符合<sup>[13]</sup>, 这也与上述的讨论相符合。结合图 1 和图 2, 可以认为图 1 中质子能

谱的不同主要是因为靶前静电激波的形成与等离子体的状态相关造成的。静电激波的形成时间是随着马赫数( $M = v / c_s$ ,  $c_s = (T_e / m_i)^{1/2}$  为离子声速)变化的, 马赫数越小, 激波形成时间越短<sup>[14, 15]</sup>。因此, 当等离子体初始温度升高时, 离子声速增加, 从而使马赫数减小, 因此, 对应等离子体初始温度越高的靶, 其激波形成得越早, 激波加速的质子数目也就越多。从图 2 中可以看到, 等离子体初始温度为  $5 \text{ keV}$  时靶前形成的激波加速的质子数目最多, 这与讨论一致。因此, 在等离子体初始温度较高的情况下, 产生的高能质子数目明显增加, 得到了相对高的质子产额。

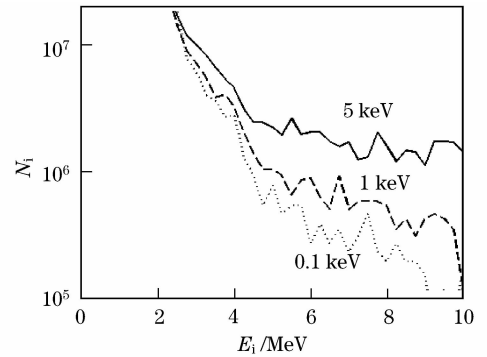


图 1 不同初始温度条件下, 激光入射 27 个周期时刻的质子能谱图

Fig. 1 Proton energy spectrum under different initial plasma temperature conditions at the time of  $27\tau$ , where  $\tau$  is laser cycle

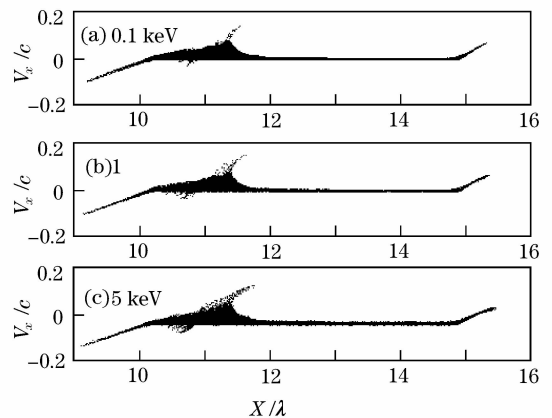


图 2 不同初始温度条件下, 激光入射 27 个周期时刻的质子相空间分布图

Fig. 2 Phase spaces ( $X, V_x$ ) of protons under different initial plasma temperature conditions at the time of  $27\tau$

图 3 是在激光强度为  $3.1 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$  情况下, 激光入射 27 个周期时刻的质子能谱图和相空间分布图。从图 3(a)中可以发现, 在入射激光强度为  $3.1 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$  情况下, 质子能谱和之前的讨论

一致,随着等离子体初始温度的增加,在质子能谱曲线上表现为质子数目的增加,但与入射激光强度为  $1.38 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$  相比质子数目增加的相对幅度有所下降,这可能是由于激光强度增大后激光活塞加速作用<sup>[16]</sup>增强导致的。图 3(b)为入射激光 27 个周期时刻不同等离子体初始温度情况下质子的相空间分布图。与图 2 对比可以发现,随着入射激光强度的增加,一方面在静电激波后面存在大量的激光活塞加速的质子,激光活塞加速作用明显;另一方面靶前静电激波加速情况与入射激光强度为  $1.38 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$  时的加速情况类似,当等离子体初始温度高时在静电激波加速区域的质子数目增多,但激光活塞加速作用降低了靶前静电激波加速的影响,使得质子能谱曲线上质子数目增加幅度有所下降。因此,在入射激光强度增加的情况下,等离子体初始温度仍然能影响高能质子的数目,但效果减弱。

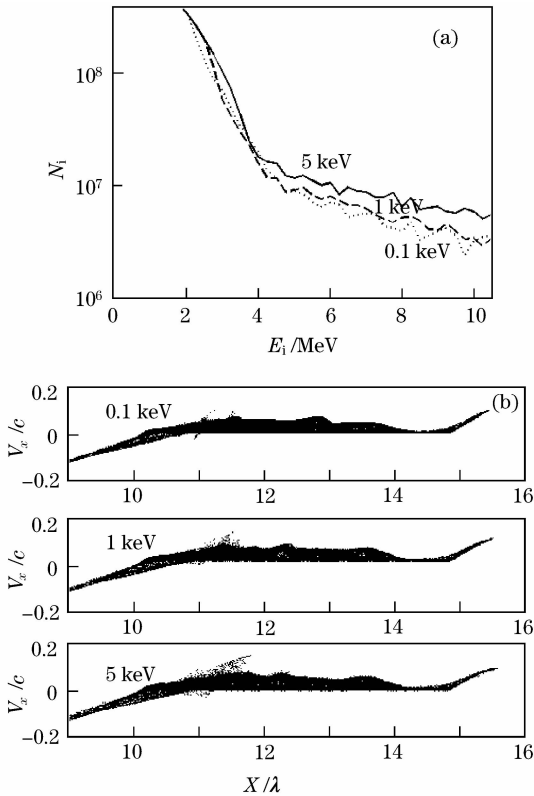


图 3 激光入射强度为  $3.1 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$  下,激光入射 27 个周期时刻的质子能谱图(a)和质子相空间分布图(b)  
Fig. 3 Proton energy spectrum (a) and phase spaces ( $X$ ,  $V_x$ ) (b) of protons under different initial plasma temperature conditions at the time of  $27\tau$  with the laser intensity of  $3.1 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$

图 4 为入射激光强度为  $5 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$  时激光入射 30 个周期时刻不同等离子体初始温度下的质子能谱图和相空间分布图。通过图 4(a)的能谱图

发现,质子能谱在等离子体初始温度为 5 keV 时最高,而等离子体初始温度为 0.1 keV 和 1 keV 的靶在激光 30 个周期时刻的质子能谱图基本相同;在图 4(b)中等等离子体初始温度为 0.1 keV 和 1 keV 情况下高能质子的最大速度为  $0.045 c$ ,此时靶前都没有激波加速,因此质子能谱曲线基本相同;而在等离子体初始温度为 5 keV 情况下高能质子的最大速度为  $0.09 c$ ,激波在此时已经产生了,因此得到了更高能和更多数目的质子,这与入射激光强度为  $1.38 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$  情况下一致,等离子体初始温度越高,激波产生时间越短。并且,可以从图 4 中看到,随着入射激光强度减小,原来在 27 个周期时刻所有靶都能产生激波,而现在在等离子体初始温度为 0.1 keV 和 1 keV 情况下激波并没有产生,激波的形成时间增加了。

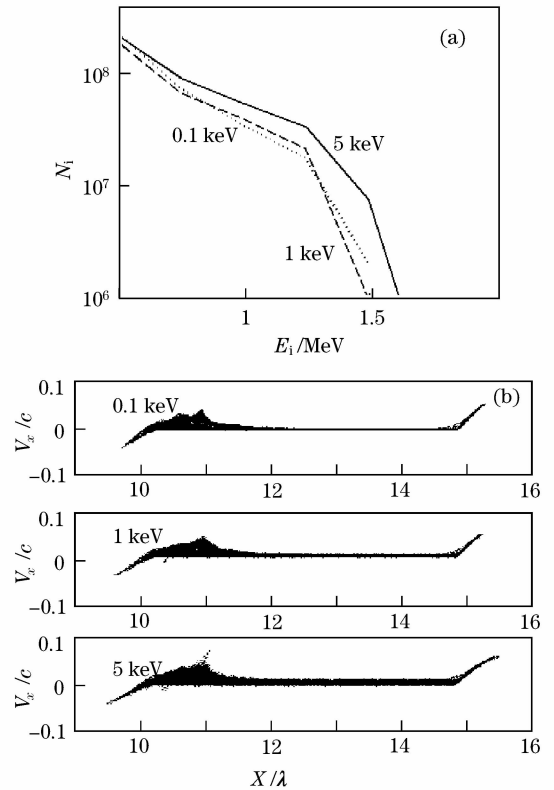


图 4 激光入射强度为  $5 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$  下,激光入射 30 个周期时刻的质子能谱图(a)和质子相空间分布图(b)  
Fig. 4 Proton energy spectrum (a) and phase spaces ( $X$ ,  $V_x$ ) (b) of protons under different initial plasma temperature conditions at the time of  $30\tau$  with the laser intensity of  $5 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$

## 4 结 论

通过二维 PIC 模拟程序研究了线偏振激光入射情况下不同等离子体初始温度对质子加速的影

响。研究表明,在等离子体初始温度适度增加的情况下,静电激波更容易形成,这时可以得到更多的高能质子;对应较高光强入射情况,等离子体初始温度对高能质子数目的影响较弱;并且,静电激波形成时间随入射激光强度的下降而增加。

### 参 考 文 献

- 1 J. A. Cobble, R. P. Johnson, T. E. Cowan *et al.*. High resolution laser-driven proton radiography[J]. *J. Appl. Phys.*, 2002, **92**(4): 1775~1779
- 2 P. K. Patel, A. J. Mackinnon, M. H. Key *et al.*. Isochoric heating of solid-density matter with an ultrafast proton beam[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**(12): 125004
- 3 S. Bulanov, V. Khoroshkov. Feasibility of using laser ion accelerators in proton therapy[J]. *Plasma Phys. Rep.*, 2002, **28**(5): 453~456
- 4 M. Roth, T. E. Cowan, M. H. Key *et al.*. Fast ignition by intense laser-accelerated proton beams[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **86**(3): 436~439
- 5 S. C. Wilks, A. B. Langdon, T. E. Cowan *et al.*. Energetic proton generation in ultra-intense laser-solid interactions [J]. *Phys. Plasma.*, 2001, **8**(2): 542~549
- 6 S. Betti, F. Ceccherini, F. Cornolti *et al.*. Expansion of a finite-size plasma in vacuum[J]. *Plasma Phys. Control Fusion.*, 2005, **47**(3): 521~529
- 7 P. Mora. Plasma expansion into a vacuum[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(18): 185002
- 8 M. S. Wei, S. P. D. Mangles, Z. Najmudin *et al.*. Ion acceleration by collisionless shocks in high-intensity-laser-underdense-plasma interaction [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**(15): 155003
- 9 E. d'Humieres, E. Lefebvre, L. Gremillet *et al.*. Proton acceleration mechanisms in high-intensity laser interaction with thin foils[J]. *Phys. Plasma.*, 2005, **12**(6): 062704
- 10 Luis O. Silva, M. Marti, J. D. Davies *et al.*. Proton shock acceleration in laser-plasma interactions[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(1): 015002
- 11 X. M. Zhang, B. F. Shen, M. Y. Yu *et al.*. Effect of plasma temperature on electrostatic shock generation and ion acceleration by laser[J]. *Phys. Plasma.*, 2007, **14**(11): 113108
- 12 Xu Han, Chang Wenwei, Zhuo Hongbin *et al.*. parallel programming of 2 (1/2)-dimensional PIC under distributed-memory parallel environments[J]. *Chinese J. Comput. Phys.*, 2002, **19**(4): 305~310  
徐 涵, 常文蔚, 卓红斌 等. 2(1/2)维等离子体粒子模拟分布式并行程序设计[J]. *计算物理*, 2002, **19**(4): 305~310
- 13 M. Zepf, E. L. Clark, F. N. Beg *et al.*. Proton acceleration from high-intensity laser with thin foil targets[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(6): 064801
- 14 D. W. Forslund, C. R. Shonk. Formation and structure of electrostatic collisionless shocks[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1970, **25**(25): 1699~1702
- 15 D. W. Forslund, J. P. Freidberg. Theory of laminar collisionless shocks [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1971, **27**(18): 1189~1192
- 16 T. Esirkepov, M. Borghesi, S. V. Bulanov *et al.*. Highly efficient relativistic-ion generation in the laser-piston regime[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(17): 175003