

文章编号: 1001-4322(2004)06-0741-04

超短脉冲超强激光与固体靶相互作用中 高能离子的产生*

银 燕, 常文蔚, 马燕云, 郭少锋, 徐 涵

(国防科学技术大学 理学院 应用物理系, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 用 2D3V PIC 粒子模拟方法得到了超短脉冲超强激光与固体靶相互作用中高能离子产生的图像, 并对其机理进行了研究。在靶前后表面都观察到了高能离子的产生, 并诊断了离子能谱。模拟结果表明, 在靶前表面所产生的高能离子, 角分布较大, 在向靶内输运过程中会损失能量; 在靶后表面产生的高能离子, 定向性很好, 能获得很高的能量。模拟得到的离子能量和实验观测结果在量级上相符。

关键词: 粒子模拟; 超短脉冲超强激光; 高能离子

中图分类号: TN246; O531

文献标识码: A

近年来, 随着激光技术的发展, 可以在实验室中产生强度在 $10^{18} \sim 10^{21} \text{ W/cm}^2$, 脉宽小于 1ps 的超短脉冲超强激光^[1]。在超短脉冲超强激光辐照固体靶的实验中, 人们在靶的背面观测到能量高达几个到几十个 MeV, 且定向性很好的高能离子的出射^[2~5]。这样的离子束在激光聚变领域具有潜在的应用价值, 其中最引人注目的是离子驱动快点火设想的提出^[2]。所以, 高能离子的产生格外受到人们的重视, 成为最近的研究热点。

对于超短脉冲强激光与固体靶相互作用中高能离子的产生机制, 已开展了很多理论及实验研究。国际上工作主要有: S. P. Hatchett 和 S. C. Wilks 等人提出了 TNSA 机制^[3,6], 认为被激光加速的高能电子能迅速穿透靶, 在靶的后表面形成一个很强的空间电荷场, 这个静电场能直接电离靶后表面上的原子, 并将离子加速到很高的能量。E. L. Clark 等人则认为实验中所观察到的高能离子是在靶的前表面产生的, 其加速是激光辐照和高能电子牵引的共同作用^[4,5]。A. Pukhov 对超短脉冲超强激光和固体靶相互作用进行了 3 维模拟^[7], 着重研究了由上述两种机制产生, 并从靶后表面出射的高能离子, 模拟表明后一种加速机制所加速的高能离子能量较低, 且出射角较大。M. Hegelich 等人^[8]在实验中采用双层材料靶, 不仅清楚地证明了 TNSA 机制的存在, 还表明超短脉冲强激光与固体靶相互作用中产生的高能离子束的离子种类、能谱、电荷态等都是可以控制的。国内对于超短脉冲强激光与固体靶相互作用的研究多集中在超热电子产生、X 射线辐射等方面^[9~11], 对于高能离子的产生研究相对较少。董全力等对飞秒激光脉冲和固体靶相互作用中高能离子的产生进行了实验和 1D3V 粒子模拟研究, 实验观测到出射的高能离子具有很好的定向性, 粒子模拟表明激光在靶的前部产生的静电场可以将离子加速到很高的能量^[12]。

本文用 2D3V PIC 粒子模拟方法对线极化超短脉冲强激光与固体靶相互作用中高能离子的产生进行了细致的数值研究, 从靶的前后表面均观察到离子加速现象, 并研究了这些高能离子的能量及角分布。

1 计算模型

我们采用自行研制的 2D3V PIC 程序模拟了超短脉冲超强激光与固体靶的相互作用, 模拟系统为 $x_y = 20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$ 。一个线极化的激光脉冲沿 x 方向从左边界垂直入射, 激光电场矢量平行于 y 方向, 波长 $\lambda = 1\mu\text{m}$, 强度(即功率密度)峰值为 $I_0 = 1.0 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$ 。激光脉冲在 50fs 内呈半高斯型上升到峰值, 持续辐照 50fs, 再呈半高斯型在 50fs 内下降到 0。激光强度在 y 方向为高斯分布, 形状因子为 $\exp[-(y - y_0)^2 / 2 \sigma_y^2]$, 其中 $y_0 = 3\mu\text{m}$ 。等离子体密度在 y 方向为均匀分布, 沿 x 方向分布为: 区域 $[5, 8]$ 内密度由 $4n_c$ 线性增加到 $10n_c$; $[8, 13]$ 内密度为 $10n_c$ 均匀分布; $[13, 15]$ 内密度由 $10n_c$ 线性降低到 $4n_c$; 其余部分为真空。其中 $n_c = 1.01 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 为与激光波长相对应的等离子体临界密度。初始时刻电子和离子速度均为 Maxwell 热分布, 电子温度为 4keV, 离子温度为 1keV, 电子和离子的质量比为 1 : 1836, 离子电荷为 $Z_i = 1$ 。计算系统共

* 收稿日期: 2003-01-10; 修订日期: 2004-01-14

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(10085002); 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 银 燕(1977—), 女, 湖北随州人, 博士, 讲师, 从事激光等离子体相互作用和光子晶体方面的研究。

1 024 × 1 024 个网格,含有 8×10^6 个模拟粒子。

2 粒子模拟结果

由于等离子体的初始密度分布大于临界密度 n_c ,激光脉冲在等离子体表面反射,反射波与入射波叠加形成驻波。由于 $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ 机制^[13]及反常趋肤效应^[14],相当一部分电子被加速并向固体靶内部传输,同时也有大量的电子向外喷射。图 1 是电子的相空间分布图($x, p_x/m_e c$)的时间演化。在 $t = 73\text{fs}$ 时刻,一部分热电子在靶前形成电子云,同时,大量高能电子向靶内输运。由于靶很薄,这些高能电子不会在靶内沉积下来,而是很快穿透靶,在靶后形成电子云,在 $t = 146\text{fs}$ 时刻的相空间图上可以观察到这一点。

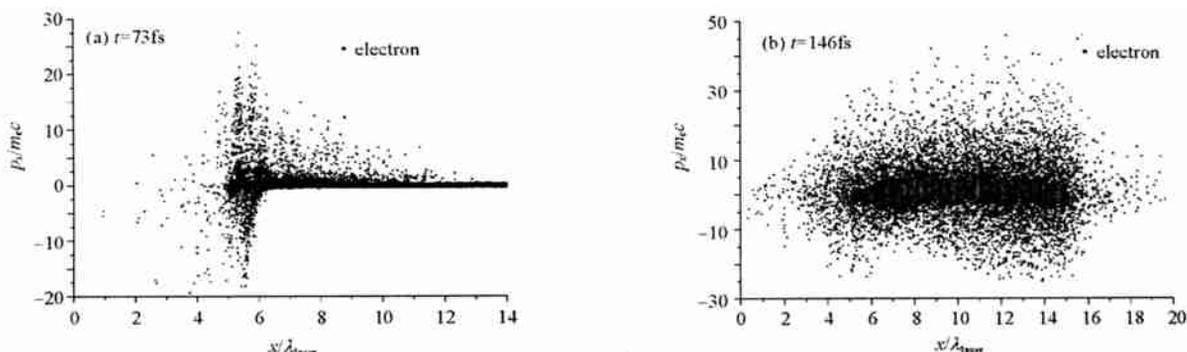


Fig. 1 Electron distribution in phase space ($x, p_x/m_e c$)

图 1 电子相空间($x, p_x/m_e c$)分布图

图 2 给出了 $t = 146\text{fs}$ 时刻离子的实空间分布。靶后表面处的离子轮廓向外凸起,这是 TNSA 机制的典型特征,表明靶的后表面处的离子被已穿透靶的高能电子所牵引。入射激光在 y 方向是高斯分布,在轴线 $y = 10\mu\text{m}$ 处强度最高,故在轴线上产生的高能电子数量最多,在轴线处的静电牵引也最强,所以图中的离子轮廓是向外凸起的。

图 3 是离子的相空间($x, p_x/m_i c$), ($x, p_y/m_i c$), ($x, p_z/m_i c$)分布图。可以看到,系统中产生了 3 群高能离子:第 1 群在靶的前部产生,并向靶外的真空扩展($p_x < 0$);第 2 群在靶的前部产生,并向靶内输运($p_x > 0$);第 3 群在靶的后部产生。这 3 群高能离子代表了 3 种不同的加速机制。靶前形成的电子云(见图 2)产生一个很强的负静电场,将靶内的一部分离子拉出靶面,形成第 1 群高能离子。同时,大量高能电子向靶内输运,由于这些向前运动的高能电子的牵引,靶前部的离子向前加速,形成第 2 群高能离子。第 3 群高能离子的产生机制为 TNSA 机制,即激光产生的高能电子穿透靶,在靶后形成电子云,加速靶后表面处的离子。从相空间($x, p_y/m_i c$)图上可以观察到靶前部产生的高能离子,无论是第 1 群还是第 2 群,在 y 方向均具有较大的动量。这是由于激光的横向有质动力造成的。由于激光在 y 方向为高斯分布,故在横向具有很强的有质动力,横向向外排开电子、离子。而靶后表面处的离子仅受到静电牵引作用,故具有较好的定向性。

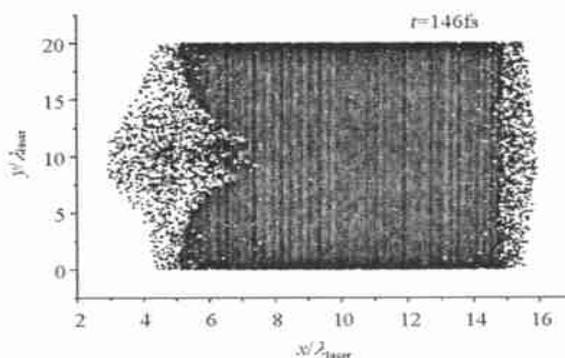


Fig. 2 Ion distribution in real space (x, y)

图 2 离子的实空间分布图

在 $t > 167\text{fs}$ 后,激光辐照消失,等离子体向真空自由扩展。从离子的相空间($x, p_x/m_i c$)分布图中可以观察到这 3 群高能离子的能量变化。第 2 群高能离子在向靶内传输的过程中,在靶内沉积能量,其最终获得的能量低于第 1、3 群高能离子。第 1、3 群高能离子受热电子牵引而加速,可以获得很高的能量,其($E_i > 1\text{MeV}$)能谱如图 4 所示。虽然这些离子并没有达到热平衡,但还是可以依 Maxwell 分布给出“有效”离子温度。可以看到,“有效”离子温度达到 MeV 量级,最大离子能量高达 17.4 MeV。

由于实验中探测器放在靶的背面^[3,4,8],故实验中探测到的高能离子是第 2、3 群高能离子。实验观察到出射的能量较低的高能离子的角分布较大,而能量较高的高能离子的角分布较小^[3,4],这可以用我们的 2 维模拟结果来说明。模拟结果表明,第 2 群高能离子受激光的有质动力影响,在 y 方向具有较大的动量,且这些离

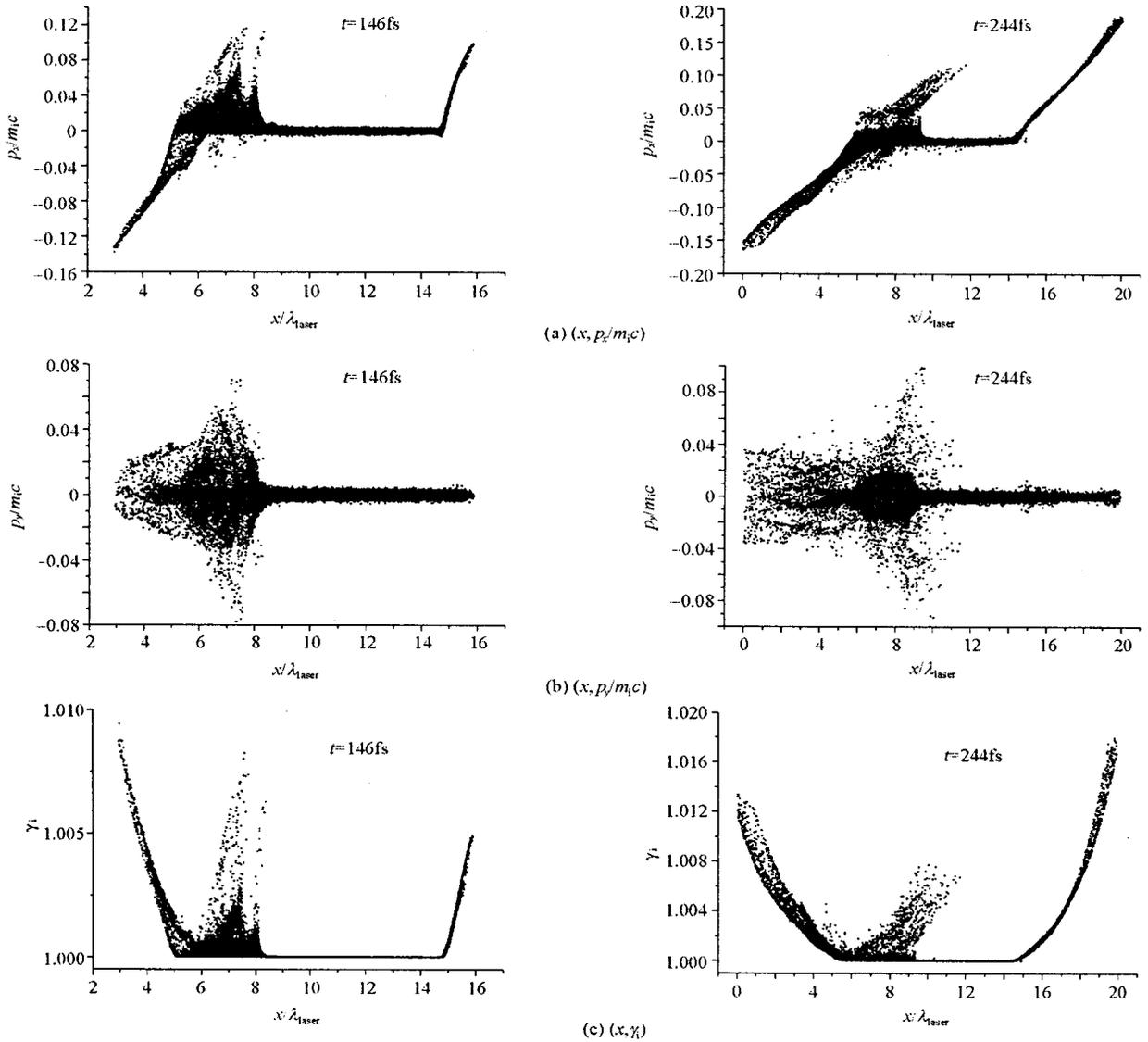


Fig. 3 Ion distribution in phase space

图 3 离子的相空间分布图

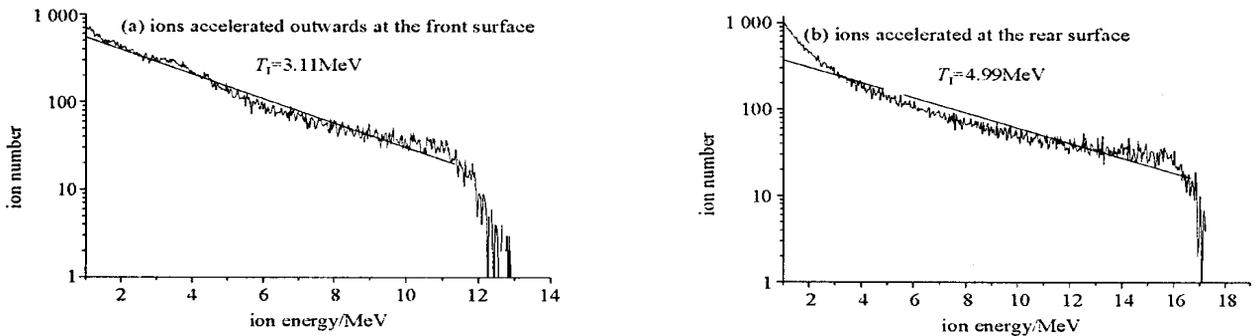


Fig. 4 Energy spectrum of the ions accelerated (a) outwards at the front target surface and

(b) at the rear surface when $t = 244\text{fs}$

图 4 在 $t = 244\text{fs}$ 时,第 1 群高能离子(靶的前部产生)的能谱(a)及第 3 群高能离子(靶的后部产生)的能谱(b)

子要经过一个靶内输运过程,这个过程中要沉积相当一部分能量。根据我们的模拟结果可以说明,实验观察到的角分布较大且能量较低的高能离子,是在靶前部产生,并经历了在靶内的输运过程后出射的;而角分布小且能量较高的高能离子,是在靶后部由于 TNSA 机制而产生的。实验中观察到离子能量约为 $5\text{MeV/nucleon}^{[8]}$,和模拟结果在量级上相符。

3 结 语

本文并未考虑靶前表面处的等离子体密度标长对离子加速过程的影响。事实上,在激光与固体靶相互作用的实验中,激光总有一个预脉冲,在固体靶前面形成一段低密度的预等离子体。当主脉冲在预等离子体中传播,会强烈地加速预等离子体中的电子,这些高能电子随激光脉冲向前传播。当激光在固体靶上反射时,这部分高能电子会由于惯性而继续向前运动,进入固体靶^[15]。显然,这些高能电子穿透靶,可以强烈地加速靶后表面处的离子。另一方面,靶前预等离子体的存在,也会影响靶前部离子的加速情况。

参考文献:

- [1] Meyer-ter-vehn J. Fast ignition of ICF targets: an overview[J]. *Plasma Phys Control Fusion*, 2001, **43**:113—125.
- [2] Roth M, Cowan T E, Key M H, et al. Fast ignition by intense laser-accelerated proton beams[J]. *Phys Rev Lett*, 2001, **86**(3): 436—439.
- [3] Snavely R A, Key M H, Hatchett S P, et al. Intense high-energy protons beams from petawatt-laser irradiation of solids[J]. *Phys Rev Lett*, 2000, **85**(14): 2945—2948.
- [4] Clark E L, Krushelnick K, Zept M, et al. Energetic heavy-ion and proton generation from ultraintense laser-plasma interactions with solids[J]. *Phys Rev Lett*, 2000, **85**(8): 1654—1657.
- [5] Zept M, Clark E L, Krushelnick K, et al. Fast particle generation and energy transport in laser-solid interactions[J]. *Phys Plasmas*, 2001, **8**(5): 2323—2330.
- [6] Wilks S C, London A B, Cowan T E, et al. Energetic proton generation in ultra-intense laser-solid interactions[J]. *Phys Plasmas*, 2001, **8**(2): 542—549.
- [7] Pukhov A. Three-dimensional simulation of ion acceleration from a foil irradiated by a short-pulse laser[J]. *Phys Rev Lett*, 2001, **86**(16): 3562—3565.
- [8] Hegelich M, Karsch S, Pretzler G, et al. MeV ion jets from short-pulse-laser interaction with thin foils[J]. *Phys Rev Lett*, 2002, **89**(8): 085002.
- [9] Chen L M, Zhang J, Li Y T, et al. Effects of laser polarization on jet emission of fast electrons in femtosecond-laser plasmas[J]. *Phys Rev Lett*, 2001, **87**(22): 225001.
- [10] 陶业争,李业军,汤秀章,等.紫外超短脉冲激光辐照固体靶产生硬 X 射线研究[J].*强激光与粒子束*,2002,**14**(3): 378—380. (Tao Y Z, Li Y J, Tang X Z, et al. Generation of hard X-ray from solid target irradiated by UV high intensity ultrashort pulse laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(3): 378—380)
- [11] Cao L H, Chang T Q, Chang W W, et al. Relativistic electron heating in laser-produced plasmas[J]. *J Plasma Physics*, 2001, **65**(5): 353—363.
- [12] Dong Q L, Zhang J, Liang T J, et al. Ion acceleration by an electrostatic field in the interaction between femtosecond laser pulses and solid targets[J]. *Chin Phys Lett*, 2001, **18**(6): 796—798.
- [13] Kruer W L, Estabrook K. $J \times B$ heating by very intense laser light[J]. *Phys Fluids*, 1985, **28**: 430.
- [14] Gamaliy E G, Dragila R. Interaction of ultrashort laser pulses at relativistic intensities with solid targets: relativistic skin effect[J]. *Physical Review A*, 1990, **42**(2): 929—935.
- [15] 银燕,余玮,常文蔚,等.超短脉冲超强激光与固体靶相互作用中预等离子体对高能电子产生的影响[J].*强激光与粒子束*,2004,**16**(1): 50—54. (Yin Y, Yu W, Chang W W, et al. Effects of pre-plasma on energetic electrons generation in ultra-short ultra-intense laser-solid interaction. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(1): 50—54)

Energetic ions generation in the interaction between ultrashort ultraintense laser pulse and solid target

YIN Yan, CHANG Wen-wei, MA Yan-yun, GUO Shao-feng, Xu Han

(College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Energetic ions generated from a solid target irradiated normally by an ultrashort ultraintense laser pulse is examined by 2D3V particle-in-cell simulations. The energetic ions are observed from both the front and the rear of the target. The ions energy spectra are obtained. The simulation results show that the energetic ions from the front of the target have a rather larger angular distribution, and deposit energy in the target, while the energetic ions from the rear target surface are highly directed and are accelerated to higher energy. The ion energy from the simulation is consistent with that observed in experiments.

Key words: Particle-in-cell simulation; Ultrashort ultraintense laser pulse; Energetic ion