

超短超强激光和稠密等离子体 相互作用的数值研究*

陆全明 钟方川 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

王 水

(中国科学技术大学地球和空间科学系, 合肥 230026)

摘 要 应用一维粒子模拟方法数值研究了超短超强激光和稠密等离子体的相互作用。结果表明, 在等离子体中激发起无规则的电场波动, 同时在等离子体中产生温度很高的电子。

关键词 粒子模拟, 超短超强激光, 稠密等离子体。

超短超强激光^[1]与等离子体作用后其中的电子运动是相对论性的^[2], 这种相互作用亦将呈现出和以往非相对论情况下不同的形态。同时还与等离子体的密度有密切的关系, 在稀薄等离子体情况下, 激光能量主要通过尾波辐射吸收^[3, 4]; 在稠密等离子体情况下, 激光能量的吸收还和电子振荡强度 r_E 与等离子体的不均匀度 L 之比有关。 $\eta = r_E/L \ll 1$ 时激光能量主要通过等离子体的非线性共振吸收^[5]; $\eta \gg 1$ 时激光能量主要通过电子的真空加热吸收^[6]。现在国际上竞相展开对超短超强激光和等离子体相互作用的理论和实验研究^[7, 8], 但用粒子模拟方法对超短超强激光和等离子体相互作用的研究则刚刚开始。本文用一维粒子模拟方法数值研究了超短超强激光和稠密等离子体在 $\eta \gg 1$ 情况下的相互作用过程。

1 计算方法

将等离子体中的电子按四维相空间 (x, v_x, v_y, v_z) 中的粒子处理, 并满足相对论运动方程, 而假定带正电荷的粒子静止不动^[9]。联立求解相对论的电子运动方程和麦克斯韦方程, 并将其表示为无量纲形式。粒子密度用等离子体临界密度 n_{cr} 标定, 时间和速度分别用激光振荡周期 ω^{-1} 和光速 c 标定, 电场 E 和磁场 B 分别用 $\frac{cE n_{cr}}{\epsilon_0 \omega}$ 和 $\frac{e n_{cr}}{\epsilon_0 \omega}$ 标定。在真实的等离子体中, 粒子的数目太大, 以至根本无法进行计算。在实际计算中采用“云粒子”模型, 以较少量的粒子来代表真实的大量粒子。将计算区域分成真空和等离子体两个相等的部分, 总长度为 $200 c \omega^{-1}$, 总的电子数为 8000, 计算中空间格距取为 $0.5 c \omega^{-1}$, 时间步长为 $0.05 \omega^{-1}$ 。

* 国家自然科学基金和国家科委 863 高技术项目资助课题。

收稿日期: 1997-06-19; 收到修改稿日期: 1997-10-14

2 计算结果

为了用粒子模拟方法模拟超短超强激光和稠密等离子体的相互作用, 假定 $t = 0$ 时有一束线偏振的激光从真空向等离子体入射, 每个激光脉冲含有 15 个波长, 激光脉冲为高斯形状, 在计算中取电子温度为 $T_e = 1 \text{ keV}$, 电子密度为 $n/n_{cr} = 2.0$, 归一化的矢势 $a = eA/m_e c^2 = 3.0$. 计算时取 x 轴为激光传播的方向, y 和 z 轴分别为激光脉冲的电场和磁场方向。

图 1 描绘了 $t = 250 \omega_0^{-1}$ 时电场 x 分量 E_x 的分布图。这是超短超强激光和稠密等离子体相互作用以后在等离子体中引起电荷分离而激发起的无规纵向电场。从图中还可以看出在等离子体和真空的交界处有一强度很大的负电场区, 这是由于超短超强激光和 $\eta \gg 1$ 的稠密等离子体相互作用后, 使等离子体中的部分电子向真空中运动, 从而激发起这样一个负电场区。图 2 是 $t = 250 \omega_0^{-1}$ 时电子密度的分布图, 可以发现在原来的真空区域有不少电子, 有些电子向上游运动很长一段距离, 甚至接近上游边界, 同时在等离子体和真空的交界处电子的密度很大, 正是这些电子形成了交界面处的负电场区。负电场区又使进入真空的电子受到向

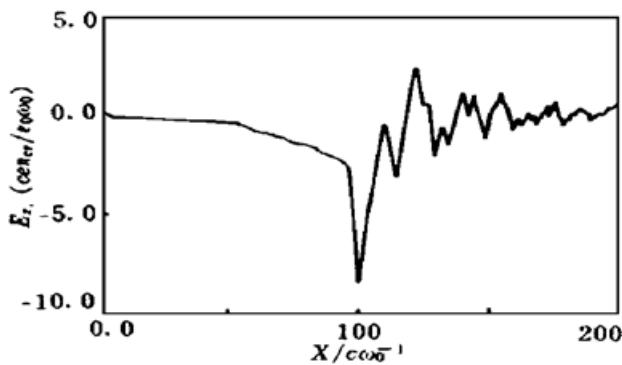


Fig. 1 The distribution of E_x at $t = 250 \omega_0^{-1}$

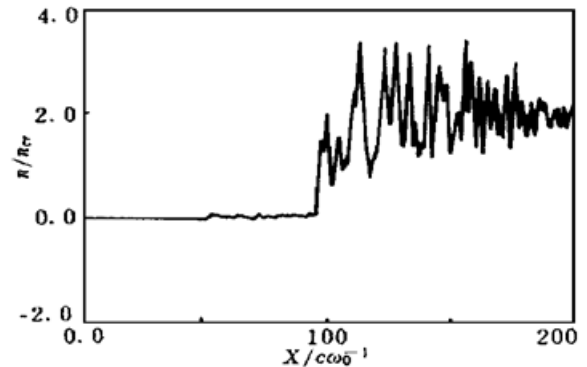


Fig. 2 The distribution of electron density at $t = 250 \omega_0^{-1}$

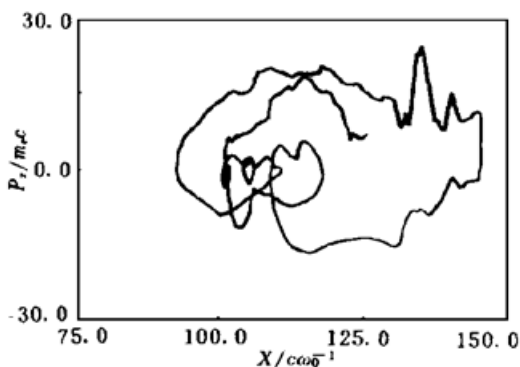


Fig. 3 Typical electron trajectory

等离子体方向的力, 使电子又重新进入等离子体中。图 3 是一个典型的电子的轨迹图。初始时刻此电子在等离子体中, 在电场和磁场的作用下, 首先向右运动, 随即进入真空, 进入真空后在负电场作用下又进入等离子体中, 马上又第二次进入真空, 进入真空最远大约为 $50 c\omega_0^{-1}$, 而且电子每次进入真空都得到很大的加速。正是这一过程使得等离子体中的电子温度被加热得很高^[10]。

图 4 是 $t = 250 \omega_0^{-1}$ 时电子的纵向动量 P_x 和横向动量 P_y 的分布图, 可以发现等离子体中的电子被加热到很高的温度, 并且电子 x 方向的能量要高于 y 方向的能量, 从这里也可以发现有很大一部分电子在超短超强激光和等离子体相互作用后进入真空。

结 论 应用一维粒子模拟方法数值研究了超短超强激光和稠密等离子体的相互作用, 结果表明, 相互作用后, 在等离子体中激发起无规电场, 同时有部分电子在真空和等离子体之间来回振荡, 得到加速, 从而使等离子体中的电子加热, 但是电子 x 方向的能量要高于 y 方向的, 真空和等离子体交界面处的负电场区在其中起着很重要的作用。

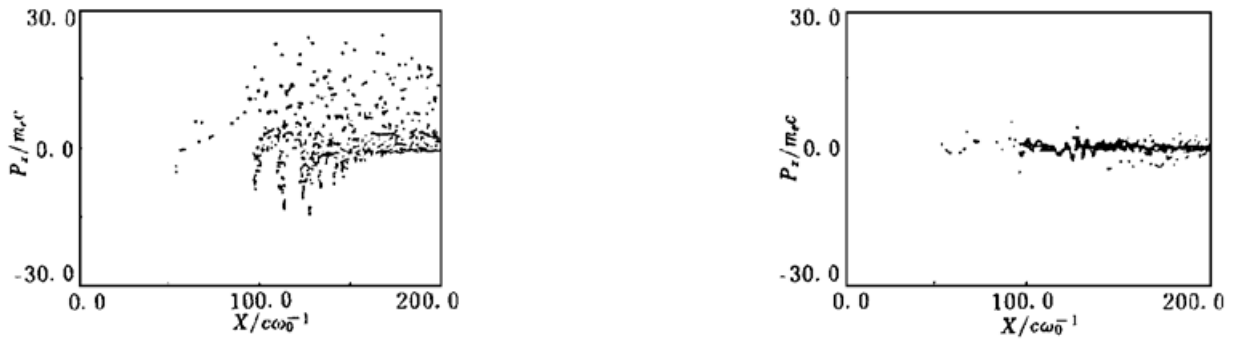


Fig. 4 The distribution of electron momentum at $t = 250\omega_0^{-1}$

参 考 文 献

- [1] P. Maine, D. Strickland, P. Pado *et al.*, Generation of ultrahigh peak power pulse by chirped-pulse amplification. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **24**(24) : 398~ 403
- [2] S. Guerin, P. Mora, J. C. Adam *et al.*, Propagation of ultraintense laser pulses through overdense plasma layers. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **3**(7) : 2693~ 2701
- [3] T. M. Antansen, Jr., P. Mora, Self-focusing and Raman scattering of laser pulses in tenuous plasmas. *Phys. Fluids*, 1993, **B5**(5) : 1440~ 1452
- [4] P. Sprangle, E. Esarey, Stimulated backscattered harmonic generation from intense laser interactions with beams and plasmas. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **67**(15) : 2021~ 2024
- [5] W. L. Kruer, The physics of laser plasma interaction, New York: Addison-Welsey, 1988, 107~ 121
- [6] P. Gibbon, A. R. Bell, Collisionless absorption in sharp-edged plasmas. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68**(10) : 1535~ 1538
- [7] G. Malka, J. L. Miquel, Experimental confirmation of pondermotive-force electrons produced by an ultrarelativistic laser pulse on a solid target. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**(1) : 75~ 78
- [8] P. Sprangle, E. Esarey, A. Ting, Nonlinear theory of intense laser-plasma interactions. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **64**(17) : 2011~ 2014
- [9] S. V. Bulanov, M. Lontano, T. Zh. Esirkepov *et al.*, Electron vortices produced by ultraintense laser pulses. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **76**(19) : 3562~ 3565
- [10] S. C. Wilks, W. L. Kruer, M. Taback *et al.*, Absorption of ultra-intense laser pulses. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **69**(9) : 1383~ 1386

A Numerical Study of the Interaction Between High-Intensity Ultrashort Laser and Overdense Plasma

Lu Quanming Zhong Fangchuan Xu Zhizhan

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

Wang Shui

(University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

(Received 19 June 1997; revised 14 October 1997)

Abstract The interaction between high-intensity ultrashort laser and overdense plasma using a particle-in-cell simulation is numerically studied. The results show that irregular electric fields are excited in the plasma after the interaction, in the meantime, the temperature of some electrons in the plasmas are enhanced very highly.

Key words particle-in-cell, high-intensity ultrashort laser, overdense plasma.