

等离子体尾波的数值研究*

陆全明 钟方川 徐至展

王 水

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

(中国科学技术大学地球和空间科学系 合肥 230026)

提要 应用一维粒子模拟方法(Particle-in-Cell)数值研究了超短超强激光($I\lambda^2 > 10^{18} \text{ W}\mu\text{m}^2/\text{cm}^2$)和稀薄等离子体相互作用后等离子体尾波的产生及其对电子的加速。结果表明,单束激光和拍波与稀薄等离子体相互作用后,在等离子体中都能激发起尾波,但拍波激发的等离子体尾波的强度和波长较大,同时等离子体中的电子动量也给加速得比较大。

关键词 粒子模拟,超短超强激光,尾波,稀薄等离子体

1 引 言

强激光和稀薄等离子体的相互作用在很多领域都有着极其重要的意义,其中之一就是强激光和稀薄等离子体相互作用后,在等离子体中会激发起等离子体尾波,从而加速等离子体中的电子^[1],这已为实验所证实^[2]。同时若有两束频率相差 $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2 = \omega_p$ (其中 ω_p 为等离子体振荡频率)的强激光束(拍波)入射进入等离子体,将在等离子体中激发起强度更大的尾波,从而更有效地加速电子^[1,3]。近年来随着啁啾脉冲放大技术的发展^[4],已经能产生出超短(激光脉冲宽度 $\leq 1 \text{ ps}$)超强(激光强度 $\geq 10^{18} \text{ W}/\text{cm}^2$)激光,由于当 $I\lambda^2 > 10^{18} \text{ W}\mu\text{m}^2/\text{cm}^2$ 时,等离子体中的部分电子被加速到很接近光速,电子运动是相对论性的,此时超短超强激光和等离子体的相互作用将会呈现出和以往非相对论情况下不同的形态。现在国际上竞相展开了对超短超强激光和等离子体相互作用的理论和实验研究^[5,6],但是用粒子模拟方法对超短超强激光和等离子体相互作用后产生的尾波的研究则刚刚开始。本文用粒子模拟方法数值研究了超短超强激光和稀薄等离子体相互作用后产生的尾波以及尾波对电子的加速。

2 数值方法

应用一维粒子模拟方法数值研究超短超强激光和稀薄等离子体相互作用后产生的尾波以及尾波对电子的加速,即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,同时由于在等离子体中带正电荷的粒子质量比较大,它们对强激光和等离子体相互作用的影响比较小,在计算中可假定带正电荷的粒子静止不动^[7,8]。于是电子遵从下列运动方程

* 国家自然科学基金和 863 计划资助项目。

$$\frac{d\mathbf{P}_i}{dt} = -e \left[\mathbf{E} + \frac{\mathbf{P}_i}{m_e} \times \mathbf{B} \right] \quad (1)$$

式中 $\mathbf{P}_i = \gamma m_e \mathbf{v}_i$ 为单个电子的动量, 其中 $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v_i^2/c^2)}}$ 为相对论因子, m_e 为电子的静止质量。而电场 \mathbf{E} 和磁场 \mathbf{B} 由麦克斯韦方程确定

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{B} &= \mu_0 \left[\mathbf{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

式中的电荷密度 ρ 和电流密度 \mathbf{j} 可通过对所有的电子和背景正电荷求和得到。

首先给定初始时刻每个粒子的位置和速度(假定粒子的速度分布满足麦克斯韦分布), 就可以计算出电荷密度 ρ 和电流密度 \mathbf{j} , 于是就可以通过方程(2) 算出电场 \mathbf{E} 和磁场 \mathbf{B} , 再通过方程(1) 得到该粒子下一个时刻的动量 \mathbf{P}_i (即速度 \mathbf{v}_i), 进而得到其位置, 再进行新一轮的计算, 直至得到较为稳定的解。但是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, 所以一般采用“云粒子”模型, 以较少量的粒子来代表真实的大量粒子, 在实际应用中很有效。在数值研究中, 我们采用了“云粒子”模型。

在实际计算中, 需将方程表示成无量纲的形式, 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 ω^{-1} 和光速 c 标定, 其中 ω^{-1} 为激光的频率, 而电场 \mathbf{E} 和磁场 \mathbf{B} 分别用 $\frac{c\epsilon_0 n_{cr}}{\epsilon_0 \omega}$ 和 $\frac{en_{cr}}{\epsilon_0 \omega}$ 标定。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 $200c\omega^{-1}$, 总的电子数为 8000, 计算中空间格距取为 $0.5c\omega^{-1}$, 时间步长为 $0.05\omega^{-1}$ 。

3 计算结果

为了数值模拟超短超强激光和稀薄等离子体的相互作用后过程中尾波的产生及其对电子的加速, 取 $t = 0$ 时激光从真空中向等离子体入射, 激光脉冲为高斯形状, 每个激光脉冲含有 15 个波长。在计算中取 $I\lambda^2 = 8.2 \times 10^{18} \text{ W}\mu\text{m}^2/\text{cm}^2$, 电子温度取为 $T_e = 1 \text{ keV}$, 电子密度为 $n/n_{cr} = 0.1$ 。

首先我们计算了单束激光和稀薄等离子体的相互作用的情况, 图 1 是 $t = 300\omega^{-1}$ 时电场 x 分量 E_x 和电子密度 n_e 的分布图, 可以看出, 在等离子体中有尾波产生, 其振幅可达到 $0.2 \frac{c\epsilon_0 n_{cr}}{\epsilon_0 \omega}$ 左右, 波长约为 $20c\omega^{-1}$, 振幅在大约 $280\omega^{-1}$ 左右达到饱和, 线性增长率约为 0.012ω 。同时电子密度也呈波动状分布, 比较此时的电子密度和电场 x 分量 E_x 的分布, 可以发现两者存在着明显的反相关的关系, 这是由于尾波是激光引起等离子体中电子的横向运动, 从而引起等离子体中电荷的分离而产生的^[1]。在强激光和稀薄等离子体相互作用过程中产生的尾波对等离子体中的电子有明显的加速作用, 图 2 是 $t = 300\omega^{-1}$ 时电子的动量 \mathbf{p} 的两个分量 p_x 和 p_y 的分布图, 从图中可以看出, 电子 x 方向的动量明显要大于 y 方向的动量, 最大可以达到 $7.0m_e c$ 左

右,这是由于尾波主要是在 x 方向加速电子。以上结论和实验结果基本符合^[9]。

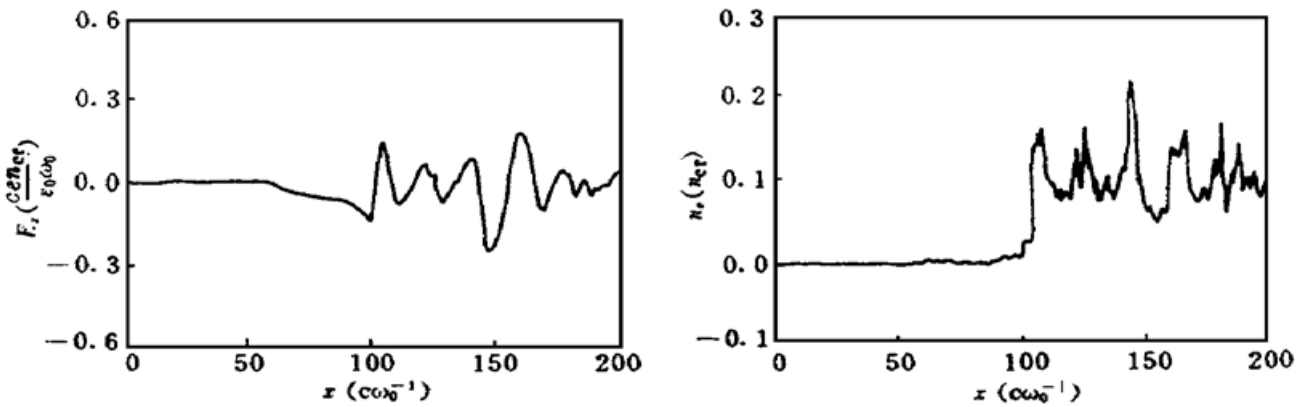


图 1 $t = 300\omega_b^{-1}$ 时电场 x 分量 E_x 和电子密度 n_e 的分布(单束激光)

Fig. 1 The distribution of E_x and n_e at $t = 300\omega_b^{-1}$ (single-frequency laser)

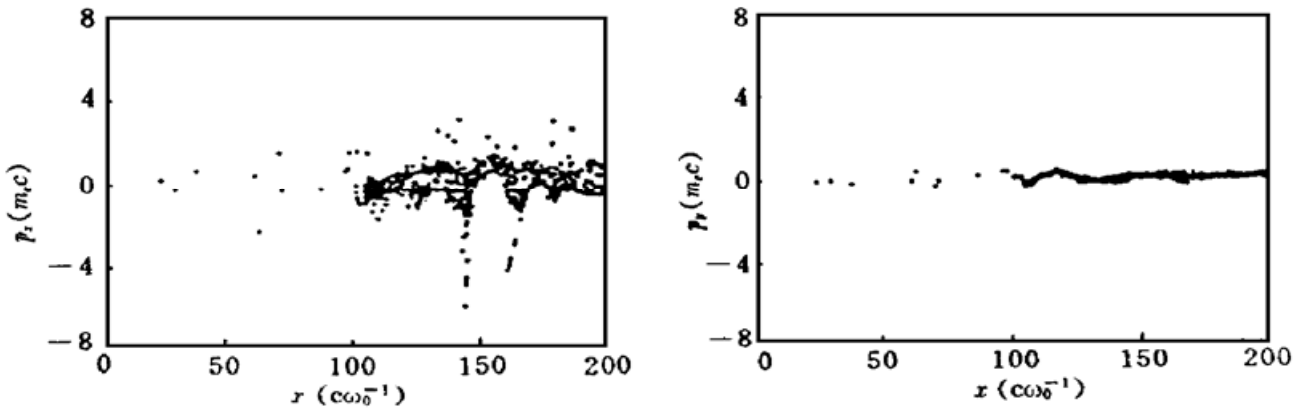


图 2 $t = 300\omega_b^{-1}$ 时电子的速度 p_x 和 p_y 的分布(单束激光)

Fig. 2 The distribution of p_x and p_y at $t = 300\omega_b^{-1}$ (single-frequency laser)

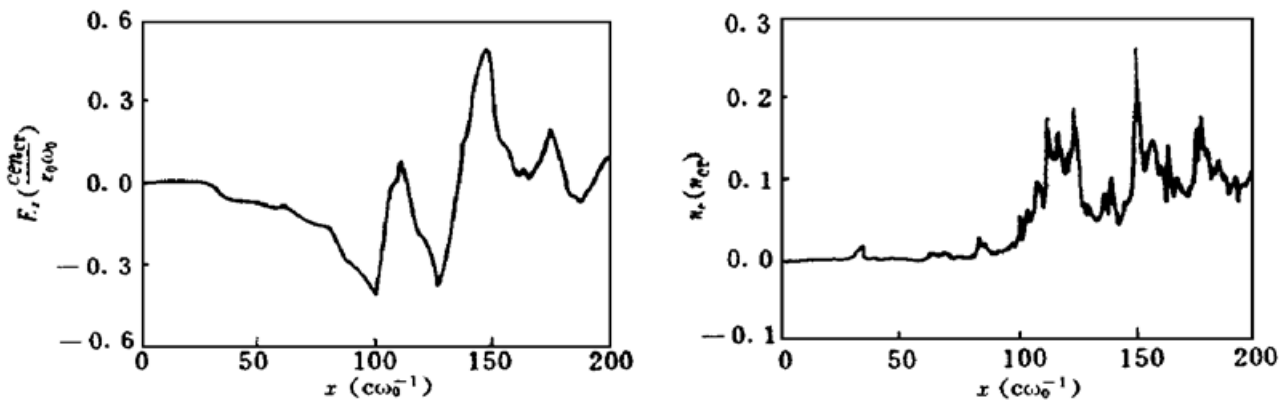


图 3 $t = 300\omega_b^{-1}$ 时电场 x 分量 E_x 和电子密度 n_e 的分布(拍波)

Fig. 3 The distribution of E_x and n_e at $t = 300\omega_b^{-1}$ (beat-wave laser)

同时我们还计算了两束频率相差 $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2 = \omega_b$ (其中 $\omega_2 = \omega, \omega_b = 0.316\omega$ 为等离子体振荡频率) 的强激光束(拍波)入射进等离子体后等离子体中尾波的产生,图 3 是 $t =$

$300\omega_b^{-1}$ 时电场 x 分量 E_x 和电子密度 n_e 的分布图,可以看出,在等离子体中同样也有尾波产生,其振幅可达到 $0.5 \frac{c n_{cr}}{\epsilon_0 \omega_b}$ 左右,波长约为 $30c\omega_b^{-1}$,振幅在大约 $250\omega_b^{-1}$ 左右达到饱和,线性增长率约为 $0.025\omega_b$,为单束激光情况下的 2 倍左右。电子密度也呈波动状分布,两者同样存在着明显的反相关的关系。图 4 是 $t = 300\omega_b^{-1}$ 时电子的动量 \mathbf{p} 的两个分量 p_x 和 p_y 的分布图,从图中可以看出,电子 x 方向的动量明显要大于 y 方向的动量,最大可以达到 $5m_e c$,和单束强激光与等离子体相互作用相比较,拍波和等离子体相互作用后能产生更强的尾波,同时也能更有效地加速等离子体中的电子。

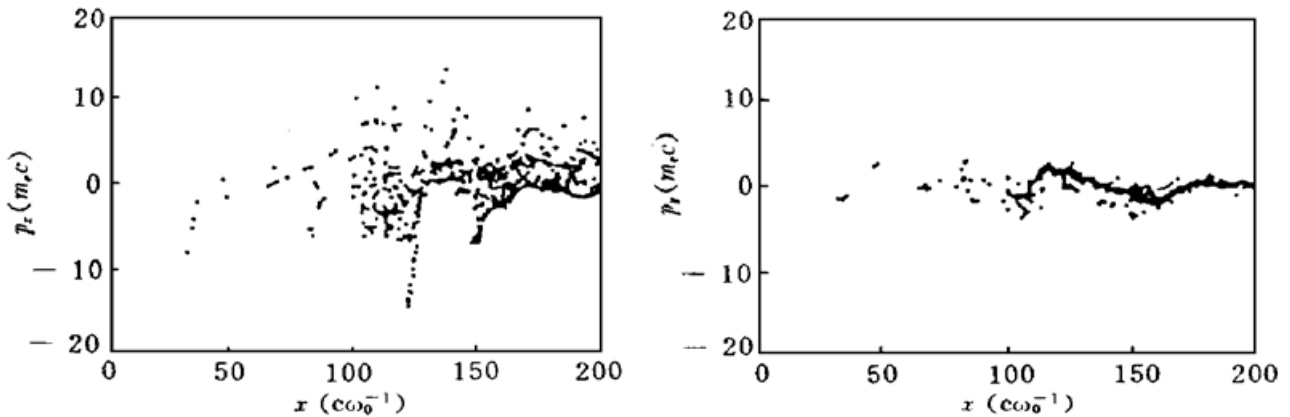


图 4 $t = 300\omega_b^{-1}$ 时电子的速度 p_x 和 p_y 的分布(拍波)

Fig. 4 The distribution of p_x and p_y at $t = 300\omega_b^{-1}$ (beat-wave laser)

4 结 论

超短超强激光入射进入稀薄等离子体后,在等离子体中激发起尾波,尾波由等离子体中的电荷分离产生,在尾波的作用下,等离子体中的部分电子被加速到很高的动量,但尾波在 x 方向加速电子更为有效;同时和单束强激光与等离子体相互作用相比较,拍波和等离子体相互作用后能产生更强的尾波,也更有效地加速等离子体中的电子。

参 考 文 献

- 1 T. Tajima, J. M. Dawson. Laser electron accelerator. *Phys. Rev. Lett.*, 1979, **43**(4): 267~ 270
- 2 P. Sprangle, E. Esarey, A. Ting *et al.*. Laser wakefield acceleration and relativistic optical guiding. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **53**(22): 2146~ 2148
- 3 D. W. Forslund, J. M. Kindel, W. B. Mori *et al.*. Two-dimensional simulations of single-frequency and beat-wave laser-plasma heating. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **54**(6): 558~ 561
- 4 P. Maine, D. Strickland, P. Bado *et al.*. Generation of ultrahigh peak power pulse by chirped-pulse amplification. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **24**(2): 398~ 403
- 5 H. Hamster, A. Sullivan, S. Gordon *et al.*. Subpicosecond, electromagnetic pulse from intense laser-plasma interaction. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **71**(17): 2725~ 2728
- 6 P. Sprangle, E. Esarey, A. Ting. Nonlinear theory of intense laser-plasma interaction. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **64**(17): 2011~ 2014
- 7 S. V. Bulanov, M. Lontano, T. Zh. Esirkepov *et al.*. Electron vortices produced by ultraintense laser pulses. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **76**(19): 3562~ 3665
- 8 Lu Quanming, Zhong Fangchuan, Yu Wei *et al.*. A numerical study of the interaction between high in-

tensity ultrashort laser and underdense plasma. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(5): 537~ 540 (in Chinese)

- 9 R. Wagner, S.-Y. Chen, A. Maksimchuk *et al.*. Electron acceleration by a laser wakefield in a relativistically self-guided channel. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(16): 3125~ 3128

A Numerical Study of the Plasma Wake Wave

Lu Quanming Zhong Fangchuan Xu Zhizhan

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

Wang Shui

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

Abstract The excitation of plasma wake wave and acceleration of electrons after interaction between a high-intensity ultrashort laser and underdense plasma using a particle-in-cell simulation is numerically studied. The results show that wake waves can be excited after the interaction between the single-frequency or beat-wave laser and underdense plasma, but the wake wave has larger strength and longer wavelength, then it can more efficiently accelerate electrons.

Key words particle-in-cell, high-intensity ultrashort laser, wake wave, underdense plasma