

激光与陡峭密度梯度等离子体 相互作用电子加热机制研究

黄永盛, 汤秀章, 路建新, 兰小飞, 张 骥

(中国原子能科学研究院 高功率准分子激光实验室, 北京 102413)

摘要: 本文利用二维 PIC 模拟了超短超强激光与陡峭密度梯度等离子体相互作用过程中电子的加热机制。结果表明, 在 10^{23} W/cm² 的超短超强激光场与陡峭密度分布的 μm 级等离子体层相互作用的过程中有质动力加速、大幅度等离子体尾场及共振吸收共同决定了电子束的加速与加热。

关键词: 超短超强激光; 等离子体; 电子; 等离子体尾场

中图分类号: O434; TL65 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2014)02-0213-06

doi: 10. 7538/yzk. 2014. 48. 02. 0213

Study of Electron Heating Mechanism in Interaction Between Laser Pulse and Plasmas With Steep-density Distribution

HUANG Yong-sheng, TANG Xiu-zhang, LU Jian-xin, LAN Xiao-fei, ZHANG Ji
(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-7, Beijing 102413, China)

Abstract: The electron heating mechanism was studied using PIC simulation in the interaction between the ultra-short ultra-intense laser and the steep-density scale length plasmas. It is found that the ponderomotive acceleration, large amplitude plasma wake field and resonant absorption determine the heating of electrons.

Key words: ultra-short ultra-intense laser; plasma; electron; plasma wake field

随着超短超强激光技术的发展, 利用激光轰击固体靶得到准单能的高能离子束在超高梯度加速器的小型化^[1]、质子束驱动核聚变^[2-3]、高能 γ 射线产生^[4-5]、质子治癌及作为传统加速器的注入器等方面有着重要的应用价值和科学意义。靶法线壳层电场加速机制(TNSA)^[6]是目前被普遍认可的描述激光轰击固体靶产生高能离子的加速机制, 其理论基础是等离子体真空自由膨胀模型。但目前尚无合适的理论来

描述在超短时间尺度具有非麦克斯韦分布的非准中性的等离子体膨胀, 因而 TNSA 加速机制仍不太清楚。

当一束超短超强脉冲激光与固体密度的等离子体相互作用时, Brunel^[7] 提出了真空加热的物理机制来解释具有陡峭密度梯度的等离子体中的电子加热过程。对于中等强度的激光, 真空加热机制受到人们的认可。真空加热机制是基于“电容假设”的设想, 忽略波的磁场。假

收稿日期: 2013-05-30; 修回日期: 2013-07-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11105233, 11105234); 973 计划资助项目(2011CB808104)

作者简介: 黄永盛(1982—), 男, 山西忻州人, 副研究员, 博士, 从事激光等离子体相互作用及激光粒子加速研究

设激光电场有一沿靶法线方向的分量,在此分量的作用下电子在平衡位置往复运动,在此过程中电子的平均能量随时间不断增加,因而被加热,这是一种新的加热机制,不同于共振吸收^[8-9]和 $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 加热^[10]。但对于超相对论的激光场,真空加热机制不再重要。为了研究超相对论下的电子加热机制,本文利用二维 PIC (particle in cell) 模拟激光在其归一化场强 $a = 223$ 时与陡峭密度分布的等离子体的相互作用,并分析其中的电子加热机制。

1 电子加热机制数值模拟的初始状态

图 1 为 PIC 模拟初始状态。在 PIC 中对参数均进行了归一化处理: x_1 、 x_2 分别为电子纵向和横向坐标;时间归一化为等离子体频率;长度归一化为 c/ω_p ,其中 c 为真空光速, ω_p 为等离子体频率;能量归一化为电子静止能量初始化的物理状态。模拟时激光聚焦在靶的前表面,等离子体密度为 $50n_c$ (n_c 为等离子体的临界密度),激光归一化场强 a 为 223。

2 模拟结果及分析

图 2~9 为不同时刻模拟的电子状态及电场分布图。图中, p_1 、 p_2 分别为电子纵向和横向动量; n_E 为电子密度随能量的分布; E_c 为电子能量; n_p 为电子密度随动量的分布。

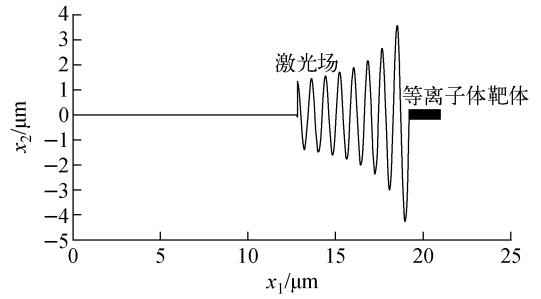


图 1 PIC 模拟初始状态

Fig. 1 Initial condition of PIC simulation

激光与电子相互作用发生的时间极短(几个 fs)。在 $t = 0.035\ 621$ fs 时,电子可获得 $10m_e c$ 的动量,且加速的电子几乎被一起推进靶。在此过程中,电子的加速由有质动力决定,不属于真空加热,电子未往复运动。由图 2 可看出, $t = 0.035\ 621$ fs 时,电子能谱几乎为均匀分布。

由图 3 可看出, $t = 0.356\ 21$ fs 时电子密度分布出现了典型的波浪结构。能谱出现了 1 个微峰结构。但总体而言,所有电子仍被有质动力推动,未往复运动。电子的局部密度很高。

由图 4 可看出, $t = 0.712\ 42$ fs 时被加速的电子进入静止的电子区域,激光场推动了新一层的电子层,高能电子进一步增多,并被热化,所以从能谱中可看到 1 个新的微峰结构,这段时间内有质动力加热占主导。

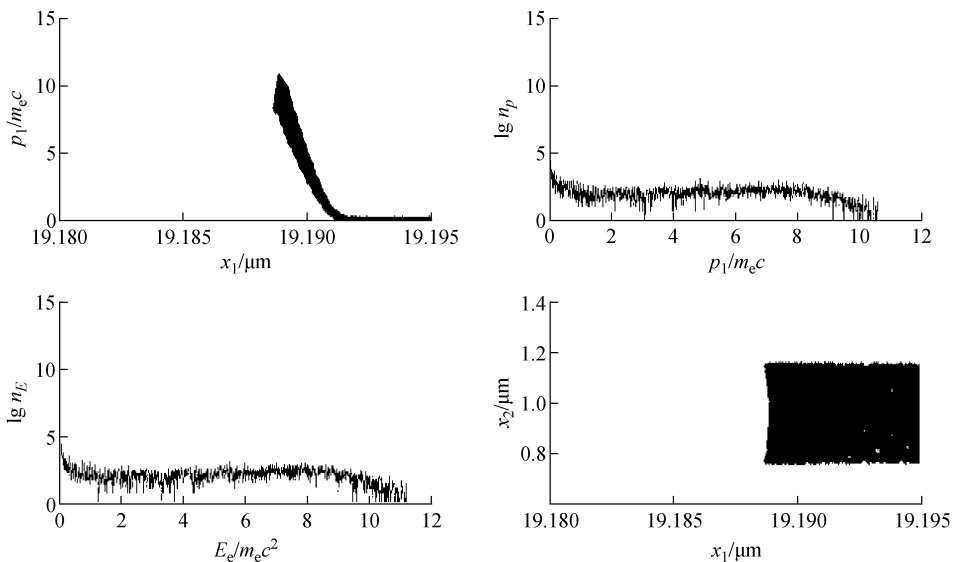


图 2 $t = 0.035\ 621$ fs 时电子状态及电场分布图

Fig. 2 State of electron and distribution of electric field at $t = 0.035\ 621$ fs

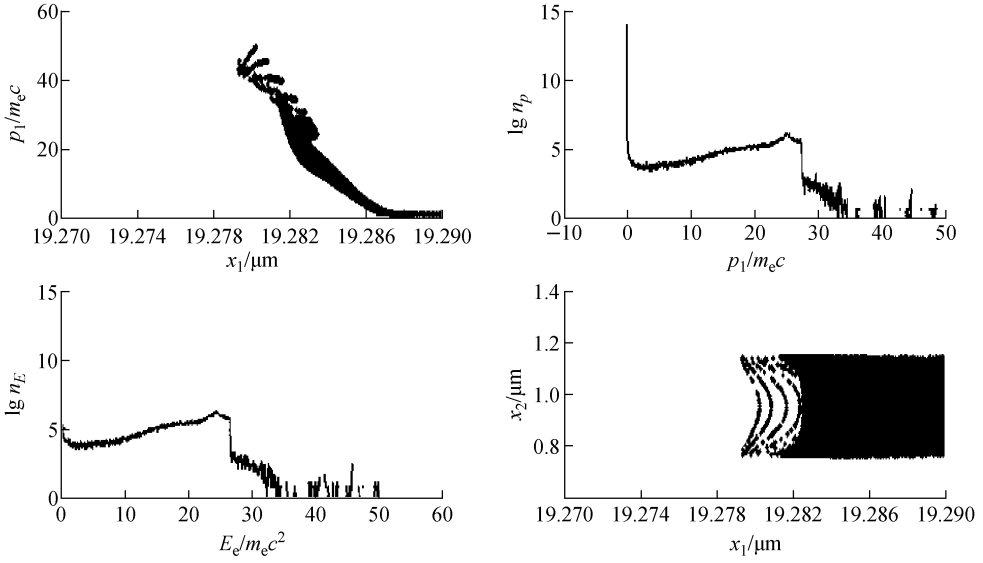


图 3 $t=0.356\ 21\ \text{fs}$ 时电子状态及电场分布图

Fig. 3 State of electron and distribution of electric field at $t=0.356\ 21\ \text{fs}$

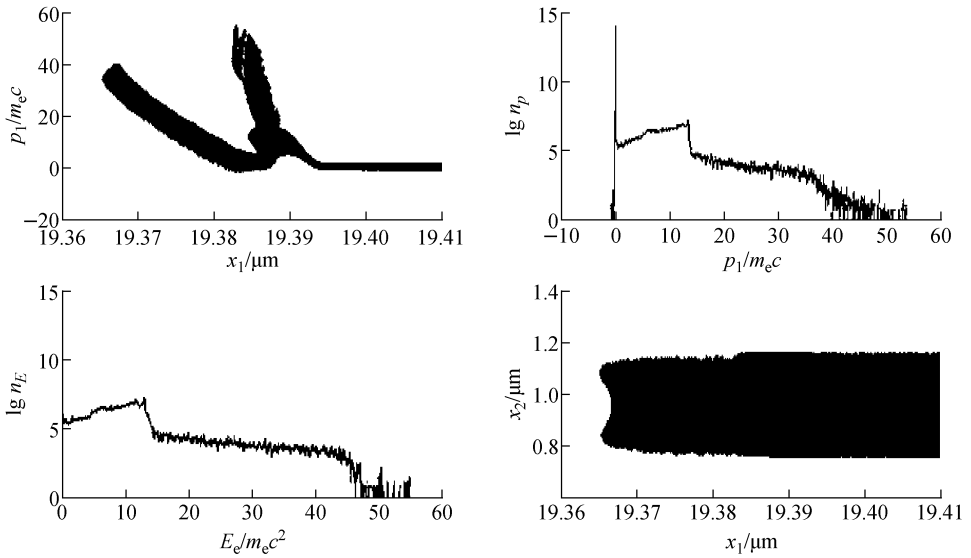


图 4 $t=0.712\ 42\ \text{fs}$ 时电子状态及电场分布图

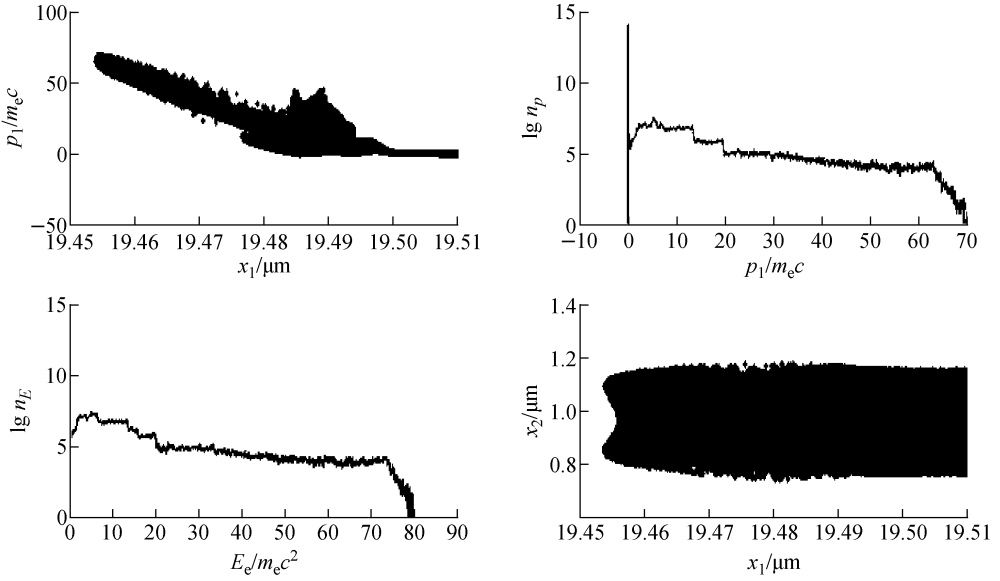
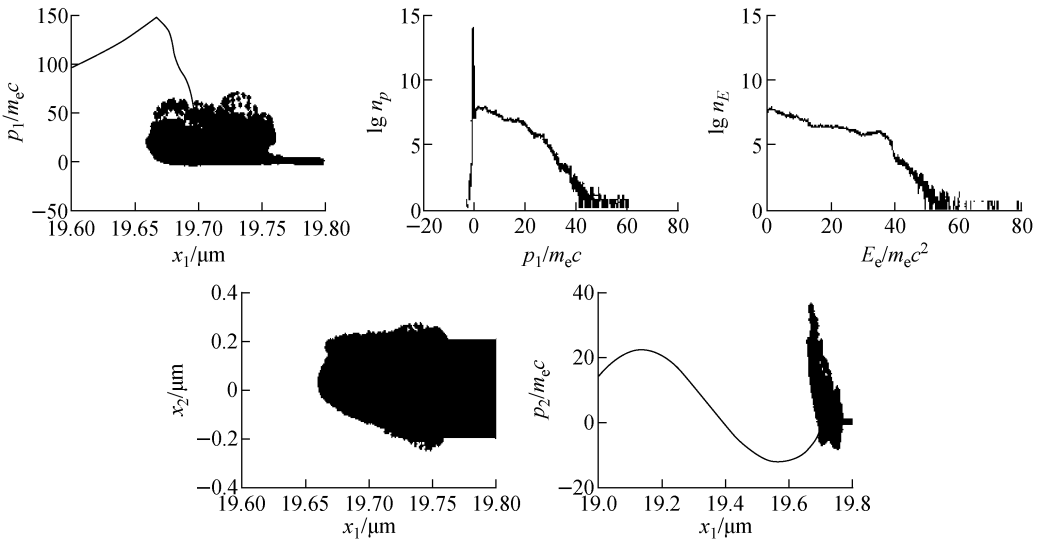
Fig. 4 State of electron and distribution of electric field at $t=0.712\ 42\ \text{fs}$

由图 5 可看出, $t=1.068\ 6\ \text{fs}$ 时, 第 2 层电子进一步被加速, 并逐步追赶上第 1 层电子, 第 1 层电子已逐步热化, 电子最大能量已接近 $40\ \text{MeV}$ 。但此时电子区域仍处于被激光场压缩 $1/4$ 周期的过程中, 有质动力加速仍占主导, 等离子体的电荷分离场仍不足以将电子拉回, 从而无法形成电子回流。

由图 6 可看出, 在接近 $2\ \text{fs}$ 时, 在电子区域已出现了较强的等离子体电荷分离场, 但

此场仍小于激光有质动力场, 不具备形成电子回流的条件。此时被有质动力加热的电子已热化, 分为两群: 1) 高能 ($20\sim 30\ \text{MeV}$) 低温约 $2.5\ \text{MeV}$; 2) 低能 ($0\sim 20\ \text{MeV}$) 高温约 $10\ \text{MeV}$ 。且热化的电子层厚度达 $0.1\ \mu\text{m}$, 电子感受到的激光场为小于 $1/4$ 周期的 y 方向的场。

从图 7 可看出, 当 $t=3.562\ 1\ \text{fs}$ 时, 在空间电荷力的作用下, 电子出现回流效应, 而此时

图5 $t=1.0686$ fs时电子状态及电场分布图Fig. 5 State of electron and distribution of electric field at $t=1.0686$ fs图6 $t=1.9592$ fs时电子状态及电场分布图Fig. 6 State of electron and distribution of electric field at $t=1.9592$ fs

被有质动力加热的电子已接近热平衡。电子能量在 90 MeV 处截止, 温度约为 18 MeV。由于电子回流效应的出现, 电荷分离场将出现双极场形式。电子的速度几乎均为正值, 无明显的往复运动, 不满足真空加热的情况。

从图 8 可看出, 当 $t=7.1242$ fs 时, 双极型电荷分离场形成, 有明显的电荷分离场。在激光场振幅处, 电子有共振吸收的情况。由于在 y 方向电子被共振加热, 因此, 整个靶型开

始扭曲。在 x 方向, 电子群分为两部分: 1) 高能部分, 被有质动力加速并达到热平衡; 2) 回流部分, 被电荷分离场牵制并热化。

由图 9 可看出, 当 $t=21.0163$ fs 时, 等离子体薄膜几乎解体, 整个电子群分为两群, 一群是被有质动力加速的, 中心能量为 300 MeV, 能散为 100 MeV, 另一群是被等离子体尾场加速并热化的, 温度约为 64 MeV。在低能区, 由于电子的总数不变, 随等离子体的快速膨胀, 所

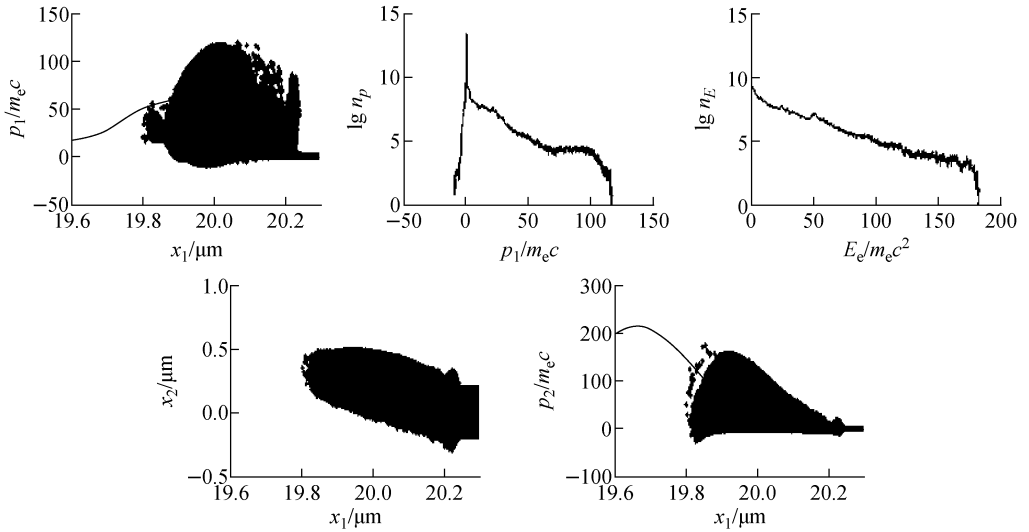


图7 $t=3.5621$ fs 时电子状态及电场分布图

Fig. 7 State of electron and distribution of electric field at $t=3.5621$ fs

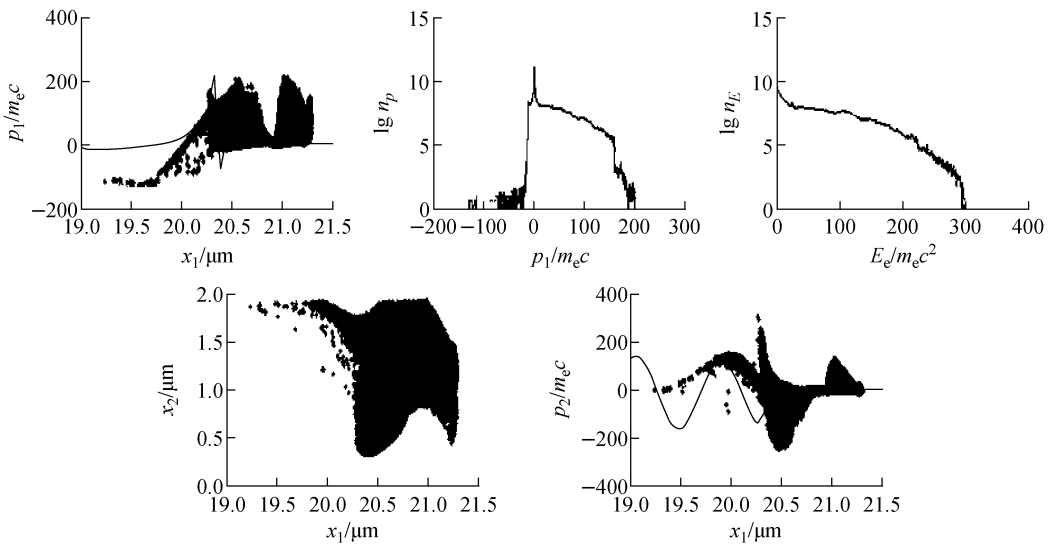


图8 $t=7.1242$ fs 时电子状态及电场分布图

Fig. 8 State of electron and distribution of electric field at $t=7.1242$ fs

占的空间迅速增加,因而其密度就会快速下降。由图9还可看出,在激光场中等离子体出现了明显的共振调制。

3 结论

从上述模拟结果可知,超强激光场与陡峭密度分布的 μm 级的等离子体层相互作用的过程中,电子加热的机制有以下3种。

1) 被激光场有质动力加速,为高能部分,中心能量为 600 MeV,能散为 100 MeV,沿激

光方向出射。

2) 被激光等离子体尾场加速并热化,形成明显的双极型的电荷分离场及电子回流效应。温度在 64 MeV 左右,主要为双向发射的电子束。

3) 在 y 方向,当等离子体尾场形成后,等离子体开始膨胀,有电荷回流效应后,部分等离子体能处于激光场振幅相位处,电子被明显地共振加热。这将直接导致薄膜靶的扭曲解体。

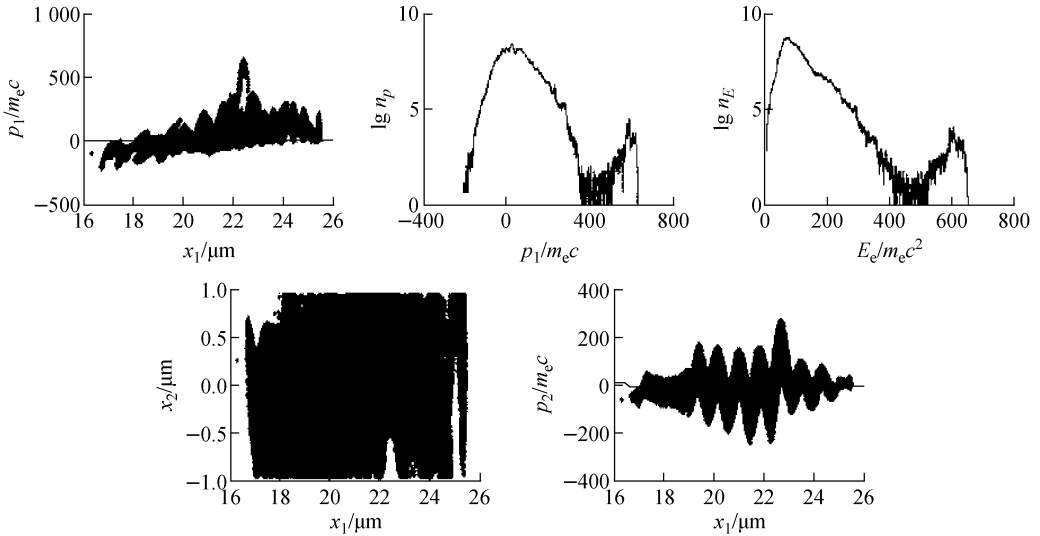


图9 $t=21.0163$ fs时电子状态及电场分布图

Fig.9 State of electron and distribution of electric field at $t=21.0163$ fs

参考文献:

- [1] SCHWOERER H, PFOTENHAUER S, JACK-EL O, et al. Laser-plasma acceleration of quasi-monoenergetic protons from microstructured targets[J]. Nature, 2006, 439(7075): 445-448.
- [2] NUCKOLLS J, WOOD L, THIESSEN A, et al. Laser compression of matter to super-high densities; Thermonuclear (CTR) applications[J]. Nature, 1972, 239(9): 139-142.
- [3] MOUROU G A, TAJIMA T, BULANOV S A. Optics in the relativistic regime[J]. Review of Modern Physics, 1998, 78(2): 309-371.
- [4] CORKUM P B. Plasma perspective on strong field multiphoton ionization[J]. Physical Review Letters, 1993, 71(13): 1994-1997.
- [5] LHUILLIER A, BALCOU P. High-order harmonic generation in rare gases with a 1 ps 1053 nm laser[J]. Physical Review Letters, 1993, 70(6): 774-777.
- [6] WILKS S C, LANGDON A B, COWAN T E, et al. Energetic proton generation in ultra-intense laser-solid interactions[J]. Physics of Plasmas, 2004, 8(2): 542-549.
- [7] BRUNEL F. Not-so-resonant, resonant absorption[J]. Physical Review Letters, 1987, 59(1): 52-55.
- [8] GINZBURG V L. The propagation of electromagnetic waves in plasmas[C]// Proceedings of International Series of Monographs in Electromagnetic Waves, Monographs in Electromagnetic Waves. New York, Oxford: Pergamon, 1970.
- [9] KRUER W L. The physics of laser plasma interactions [M]. United States: Addison-Wesley Publishing Co., 1988.
- [10] KRUER W L, ESTABROOK K. $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ heating by very intense laser light[J]. Physics of Fluids, 1985, 28(1): 430-431.