

# 激光等离子体中的自生磁场和质子加速

阿布力克木 阿不都热苏力

新疆大学物理科学与技术学院, 新疆 乌鲁木齐 830046

**摘要** 选用不同类型的等离子体薄靶,用二维 particle-in-cell(PIC)粒子模拟方法系统研究了超强激光脉冲与等离子体薄靶相互作用中产生的自生磁场和质子加速行为,结果发现:当功率密度为  $10^{20}$  W/cm<sup>2</sup> 的超强激光与等离子体薄靶相互作用时,由于等离子体靶面所产生的自生磁场作用使产生的质子分布呈现空间定向发射,发射的方向和高能质子能量与等离子体靶面密切相关,能量越高发散角越小,而质子加速越好。在圆形薄靶中质子最大能量达到 41.1 MeV。研究结果对惯性纳米聚变快点火和肿瘤治疗等方面具有重要的应用价值。

**关键词** 超快光学;超强激光;平板靶;圆形靶;数值模拟;自生磁场

中图分类号 O434.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.021401

## Self-Magnetic Field and Proton Acceleration in a Laser Plasma Interaction

A Abulikemu A Abudurexiti

*School of Physics and Technology, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China*

**Abstract** By selecting different types of thin plasma targets and applying two-dimensional particle-in-cell (PIC) simulation system, the acceleration behaviour of proton in the self-generated magnetic field induced by ultra intense laser and the thin plasma target interaction are studied. The results show that when the power density of interaction of intense laser is  $10^{20}$  W/cm<sup>2</sup>, due to the self-generated magnetic field produced plasma target, the proton distribution exhibits space directional emission; the emission direction and the energy of the high energy proton are closely related to the plasma target surface. The higher proton energy, the smaller the divergence angle and the better proton accelerator effect are. In the round thin plasma target, the proton maximum energy reaches 41.1 MeV. This result has important application value for the inertial nano fusion fast ignition and tumour therapy.

**Key words** ultrafast optics; ultra intense laser; slab target; circular target; numerical simulation; self-generated magnetic field

**OCIS codes** 140.3295; 320.2250; 320.7090

## 1 引言

世界能源短缺、温室效应及能源战略安全等严峻挑战使得大规模发展可再生能源的需求日益迫切,基于核裂变反应的核裂变能源也由于安全性和核废料的处理等问题而不尽如人意,人类期待着新的能源。受控热核聚变反应能释放巨大的能量,而且由于这种能源干净、安全,以用之不竭的海水作为原料,因此,受控热核聚变能作为人类理想的洁净能源,已成为理论和实验研究者们所关注的热点问题之一。但激光核聚变过程中强激光脉冲与靶等离子体相互作用中产生的自生磁场和各种不稳定性等因素已经对蓬勃发展的激光惯性约束核聚变研究领域形成显著制约。为解决这种制约,多年来研究人员进行了许多引人注目的实验和数值模拟研

收稿日期: 2014-06-06; 收到修改稿日期: 2014-07-01; 网络出版日期: 2015-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(11164030, 10965008, 11465019)

作者简介: 阿不力克木(1989—),男,硕士研究生,主要从事超强激光与等离子体相互作用等方面的研究。

E-mail: ablikim27@126.com(通信联系人)

导师简介: 阿不都热苏力(1961—),男,博士,教授,主要从事超强激光与等离子体相互作用等方面的研究。

E-mail: abdrusul@sina.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 [www.opticsjournal.net](http://www.opticsjournal.net)

究,且取得了较好的成绩。这些研究成果在惯性约束核聚变中的“快点火”,超热电子能量的传输<sup>[1]</sup>,激光加速电子、质子和重离子<sup>[2-3]</sup>,X射线源<sup>[4]</sup>的探索等许多领域带来了新的希望。理论与实验研究表明,当超强激光与等离子体相互作用时,电子在激光传播方向被强烈加热,被加热的超热电子流向等离子体内部运输,可以激发特斯拉量级的自生磁场<sup>[4-6]</sup>。近年来,Fuchs等<sup>[7-15]</sup>尽管对超强激光与等离子体相互作用中产生的自生磁场,超热电子加速,质子加速从理论、计算机模拟以及实验测量方面进行了研究,但是由于超强激光与等离子体相互作用中一些过程的物理描述非常复杂,到目前为止,对自生磁场,超热电子加速,质子加速等问题的探索还不到理想的地步,因此,进一步细致地分析自生磁场的空间分布和时间演化,磁场对质子加速的影响等对于激光等离子体相互作用的深入研究是有重要意义的<sup>[16]</sup>。另外在激光等离子体相互作用的应用研究中,靶的几何结构也是一重要因素,它直接影响激光等离子体的耦合效率<sup>[17]</sup>。

本文用二维 *partical-in-cell* (PIC) 粒子模拟方法研究了超强超短激光脉冲与平板及圆形凹面靶相互作用中产生的自生磁场的质子加速情况,并给出了靶背后表面上的温度梯度与密度梯度的叉乘所引起的自生磁场表达式,得到了平板和圆形靶表面上的自生磁场模拟值,并最终在靶后凹面区得到了聚焦性好、能量高的质子束。

## 2 理论分析

当超强激光与等离子体相互作用时,由于等离子体表面上的密度和温度梯度的不平行、共振吸收或者高频压力在等离子体表面处理中会产生自生磁场。在激光脉冲的持续时间内,这个自生磁场是准稳态的。由于密度梯度是沿靶面的法线方向,而温度梯度则是以激光焦点为中心,在与靶面平行的平面内呈向外辐射状,因此,温度梯度与密度梯度的叉乘所产生的自生磁场肯定是环形结构的(如图1所示,图中  $\mathbf{J}$  为电流密度);这种自生磁场明显地影响激光吸收和各种输送过程。随着时间的推移,由于等离子体的对流和扩散,温度梯度和密度梯度逐渐变缓,磁场增长变慢,最后停止增长,达到饱和。

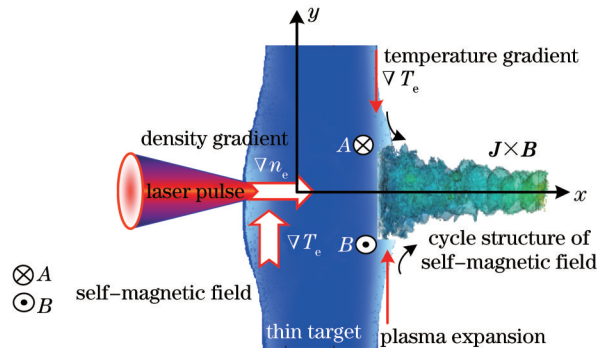


图1 激光等离子体相互作用中热电机理及其环形结构

Fig.1 Thermoelectric mechanism of laser-plasma interaction and its cycle structure

为推导自生磁场的物理来源,将质子看成粒子,而将电子视为无质量的流体,在这假设下电子遵从下列运动方程<sup>[18-19]</sup>:

$$n_e m_e \frac{d\mathbf{v}_e}{dt} = en_e [\mathbf{E} + (\mathbf{v}_e \times \mathbf{B})] - \nabla P_e, \quad (1)$$

式中  $\mathbf{v}_e$  为电子速度,  $e$  为电子电荷,  $m_e$  为电子质量,  $n_e$  为电子密度,  $P_e$  为电子压力,  $\mathbf{E}$  为电场,  $\mathbf{B}$  为磁场。由于电子视为无质量的流体,(1)式中电子质量为零。由电子的运动而形成的磁场和电场遵从如下法拉第方程:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{E}. \quad (2)$$

将(1)式两边取旋度,然后将它代入(2)式整理可到以下结果:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \frac{1}{\mu_0 \sigma} \nabla^2 \mathbf{B} + \nabla \times (\mathbf{v}_e \times \mathbf{B}) - \frac{1}{n_e^2 e} \nabla n_e \times P_e, \quad (3)$$

式中  $\mu_0$  为磁导率,  $\sigma$  为电导率。另外由电子的状态方程可求电子压力为

$$P_e = n_e k_B T_e, \quad (4)$$

式中  $k_B$  和  $T_e$  分别为玻尔兹曼常数和电子温度。将(4)式代入(3)式可得

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \frac{1}{\mu_0 \sigma} \nabla^2 \mathbf{B} + \nabla \times (\mathbf{v}_e \times \mathbf{B}) - \frac{k_B}{n_e e} (\nabla T_e \times \nabla n_e). \quad (5)$$

由(5)式可以看出,由超热电子的运动而形成的自生磁场热源项为

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \frac{k_B}{en_e} (\nabla T_e \times \nabla n_e). \quad (6)$$

在线偏振的情况下  $T_e$  可以表示为<sup>[18]</sup>

$$k_B T_e = m_0 c^2 (\sqrt{1 + \lambda_\mu^2 I_{18} / 1.37} - 1), \quad (7)$$

式中  $I_{18} = I / (10^{18} \text{ W/cm}^2)$ , 是以  $10^{18} \text{ W/cm}^2$  为单位的强度,  $\lambda_\mu$  是以  $\mu\text{m}$  为单位的激光波长,  $m_0$  为电子静止质量,  $c$  为光速。对(6)式作进一步分析得到<sup>[18]</sup>

$$|\mathbf{B}| \approx \left( \frac{1}{2\pi} \right)^2 \frac{\lambda_L^2}{l_T l_n} \omega_L t \frac{T_e}{m_0 c^2} \frac{m_0 \omega_L c}{e} \approx 2.3 \times 10^{-2} \times \frac{\lambda_L^2}{l_T l_n} \omega_L t I_{18} \times 101, \quad (8)$$

式中  $\omega_L$  是激光的频率,  $B_0 = m_0 \omega_L c / e = 10100 \text{ T}$  为归一化磁场, 且  $l_T, l_n$  是分别为表示温度标长和等离子体密度标长的特性参量。

从(8)式可见,激光沿  $x$  轴方向传播时,电子密度梯度也是沿  $x$  轴方向产生(激光电场方向),温度梯度沿  $y$  轴方向产生(沿着径向)。结果这两个不共线机制所激发的自生磁场的方向沿  $z$  轴方向,且产生的磁场为环状结构。

### 3 数值模型

用三维超粒子 ZOHARPIC 相对论电磁模拟程序对超短超强激光与平面、圆形凹面靶相互作用是产生的自生磁场和质子最大能量随空间和时间演化的情况进行研究。圆形凹面靶的设计如图2所示。模拟系统参量设计如下:模拟系统盒子的尺寸为  $118 \text{ mm} \times 17 \text{ mm}$  (如图2所示),凹面靶深度  $D$  为  $0.6 \text{ mm}$ , 半径  $R$  为  $1.5 \text{ mm}$ 。包含网格数为  $3500 \times 500$ , 等离子体均匀布满整个模拟盒。等离子体的密度标长分别为  $L_g = 1 \text{ mm}$  和  $L_f = 2 \text{ mm}$ , 为得到较高能的质子加速,在  $L_f$  区域内设计为高密度等离子体,而  $L_g$  区域设计为低密度预等离子体。在靶的中心轴  $x$  方向采用电磁场的吸收边界条件,在  $y$  方向采用周期边界条件。在模拟中,等离子体密度为  $4n_c$  ( $n_c = 1.0 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$  为临界等离子体密度),初始等离子体密度是均匀的。p 偏振激光沿  $x$  方向从左侧正入射,通过一段真空区域作用到等离子体上。强度在  $yz$  方向上是高斯分布,激光电场矢量平行于  $x$  方向,总的粒子数约为  $7 \times 10^5$ , 波长  $\lambda = 1.06 \text{ mm}$ , 频率为  $\omega_L = 1.78 \times 10^{15} \text{ rad/s}$ , 激光束的直径为  $3.0 \text{ mm}$ , 强度峰值为  $I_L = 10^{20} \text{ W/cm}^2$ , 足以引起强的相对论电子振荡,激光脉宽为  $40 \text{ fs}$ 。初始时刻粒子速度为麦克斯韦分布,离子作为电中性背景,初

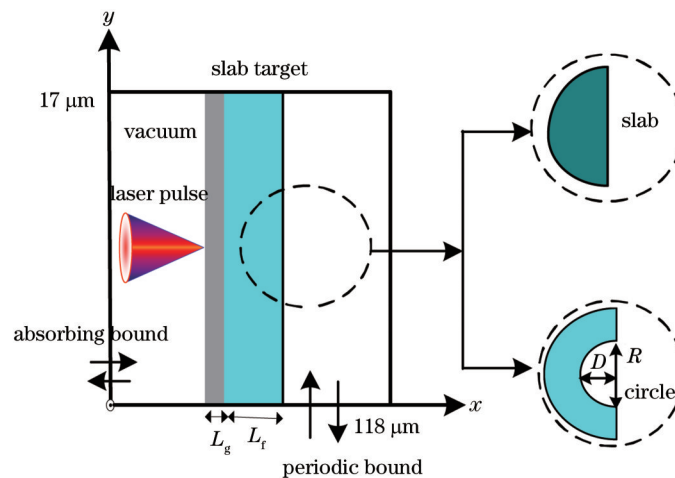


图2 粒子密度在  $x$  方向的分布和模拟模型

Fig.2 Distribution of particle density along  $x$ -direction and simulation model

始时刻系统内的净电荷和净电流处处为0,电磁场处处为0。初始电子温度为1 keV,离子温度为0.8 keV,电子和离子的质量比为1:1836。系统参数的空间格距和时间步长分别为 $0.3c/\omega_L$ 和 $0.1/\omega_L$ 。

#### 4 模拟结果及分析

图3和图4为等离子体表面温度梯度与密度梯度的叉乘所产生的自生磁场及随时间的演化图。从图3可以看出,在靶表面A点( $x\omega_L/c=108$ 、 $y\omega_L/c=60$ )和B点( $x\omega_L/c=108$ 、 $y\omega_L/c=32$ )出现强磁场,其方向分别向外和向内,出现于强磁场部分就落在靶背面的平面靶表面上。无论从A、B中的哪一个点来看,磁场都由温度和密度梯度的非共线而产生。在等离子体表面处,密度梯度的方向对电子加速形成法线方向的电子流,由于这个电子流形成电流的存在,电子的温度梯度和密度梯度分布呈现扰动,产生准静态自生磁场。图4为在平板和圆形凹面靶A点上所得到的自生磁场时间演化图。从图4可知,平板和圆形凹面靶表面上产生的自生磁场大小因靶形的不同而不同,在平板靶表面上产生的磁场值较弱,而在圆形凹面靶表面上产生的磁场值较强,虽然自生磁场的产生有利于电子或质子定向发射,但是对电子热传导的输运具有不利影响。计算中自生磁场B分量的最大值与激光强度上升到峰值时的磁场强度 $B_0=m_0\omega_L c/e=10100$  T作归一化。

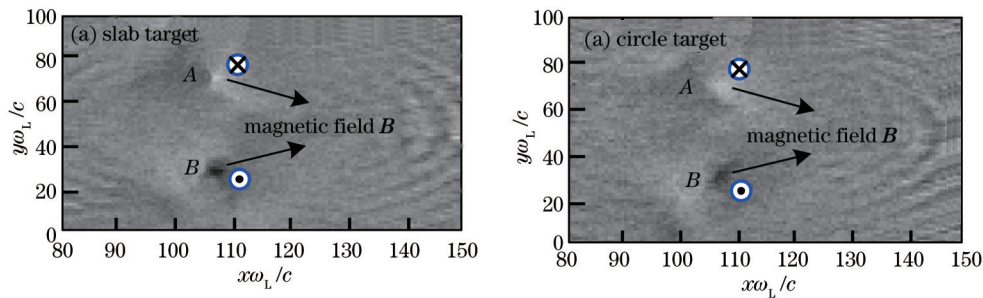


图3 在 $\omega_L t=350$ 时自生磁场的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of self-generated magnetic field at  $\omega_L t=350$

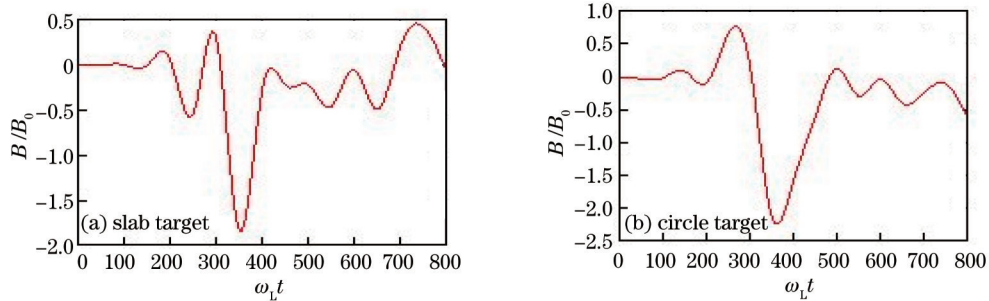


图4 在 $\omega_L t=350$ 时A点自生磁场随时间的演化图

Fig.4 Time evolution of self-generated magnetic field on point A at  $\omega_L t=350$

图5给出了平板和圆形靶中的质子能量在 $\omega_L t=350$  (196.6 fs)时的空间分布。从图5可以看出,靶后表面质子被超热电子拉出后,有效地向前加速,由于平面和圆形靶后表面产生的电场和磁场方向和空间分布不同,它们对质子加速的有效程度也不相同,与平面靶不同,圆形靶后焦平面上会聚的超热电子所形成的静

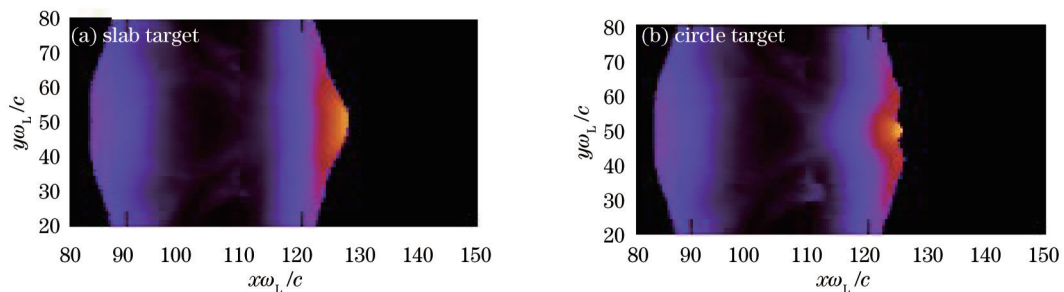


图5 质子能量在 $\omega_L t=350$ 时的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of proton energy at  $\omega_L t=350$

电场不仅使质子被迫在焦平面方向上运动,还让它在激光入射方向准直和加速。因此,圆形凹面在抑制质子束的横向发散和准直质子等方面比平面靶有效得多。

图6为两种等离子体薄靶在 $\omega_L t = 800$  (449 fs)时的质子能谱分布图,图中 $n_c$ 为临界密度。从图6可以看出,由平板获得的能量比圆形靶所获得的能量低一些,这是因为在等离子体具有平板结构时,激光有质动力所产生的高能电子在向等离子体靶内输运的过程中受到激光成丝不稳定性 and 强自生磁场的影响,损失较多的能量,从而影响产生的高能质子能量。在强激光脉冲与圆形等离子体靶相互作用所获得的的最大能量为41.1 MeV,而采用平面靶得到的最大能量为36.0 MeV。这充分表明圆形靶相对于平面靶更有利于产生高能质子束。

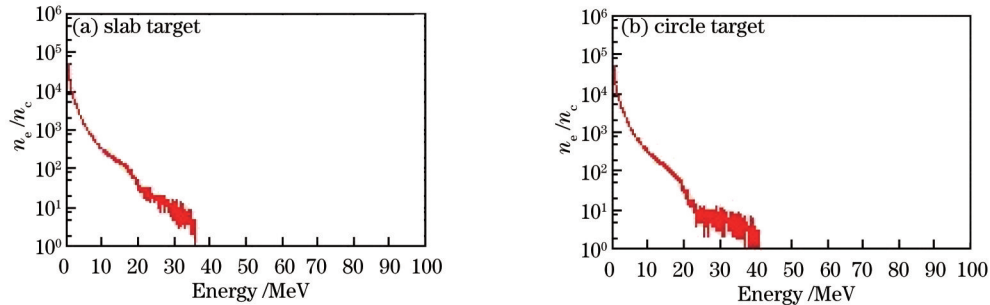


图6  $\omega_L t = 800$  时的质子能谱分布图

Fig.6 Energy spectra of the protons at  $\omega_L t = 800$

## 5 结 论

用二维PIC粒子模拟方法系统研究了超强激光脉冲与不同结构等离子体薄靶相互作用中产生的自生磁场和质子加速行为,从数值模拟和理论分析结果可以看出,强激光作用下在平板和圆形靶后表面区域产生温度和密度梯度的扰动,这个温度和密度梯度的扰动和相互非共线性引起了自生磁场。这个自生磁场的存在使质子分布有效地控制在更小的范围内,靶后表面发射的质子方向和能量与等离子体靶面密切相关,能量越高发散角越小,而质子加速越好。存在一个最适宜的等离子体靶能够使被加速的质子获得最大的能量。这是因为如果靶是平板靶,则在激光穿透靶背后所建立的加速电场对质子不能够有效地引导在某一个指定方向,如果靶是圆形靶,当脉冲穿出靶后,超热电子及其激发的强自生磁场向真空扩散,在靶后形成准静态电场,将质子加速到兆电子伏的高能。与平面靶相比,圆形靶在电子或质子加速方面具有更显著的优越性。

## 参考文献

- 1 Liu Zhanjun, Zhu Shaoping, Cao Lihua, *et al.*. Study of laser plasma interactions using Vlasov and Maxwell equations [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(12): 7084–7089.  
刘占军, 朱少平, 曹莉华, 等. 利用一维 Vlasov 和 Maxwell 方程模拟激光等离子体相互作用[J]. *物理学报*, 2007, 56(12): 7084–7089.
- 2 Cai Dafeng, Wang Lijuan, Wang Jian, *et al.*. Self-generation magnetic field in the ultrashort ultrahigh laser-produced plasma research [J]. *J Atomic and Molecular Physics*, 2009, 26(3): 65–69.  
蔡达锋, 王利娟, 王 剑, 等. 超短超强激光-等离子体中自生磁场的研究[J]. *原子与分子物理学报*, 2009, 26(3): 65–69.
- 3 Shen Baifei, Zhang Xiaomei. Latest progress and prospect of laser induced particle acceleration under high energy density conditions [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(9): 093201.  
沈百飞, 张晓梅. 高能量密度下激光粒子加速等研究的最新进展和展望[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(9): 093201.
- 4 A Abudurexiti, P Tuniyazi, Wang Qian. Self-generated magnetic fields and energy transport by ultra-intense laser-plasma interaction [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(12): 3223–3228.  
阿不都热苏力, 帕尔哈提, 王 倩. 超强激光等离子体相互作用中的自生磁场与能量运输[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(12): 3223–3228.
- 5 Li Yutong. Experimental Studies of Axial Magnetic Fields and Optical Diagnostic of Femtosecond Laser Plasmas [D]. Beijing: China Academy of Engineering Physics, 2001.  
李玉同. 飞秒激光等离子体光学诊断和自生磁场实验研究 [D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2001.
- 6 Zheng Chunyang, Liu Zhanjun, Li Jiwei, *et al.*. Spatio temporal evolution of electron beam instability in collisionless

- plasmas [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(5): 2138–2146.
- 郑春阳, 刘占军, 李纪伟, 等. 无碰撞等离子体中电子束流不稳定性的时空演化研究[J]. *物理学报*, 2005, 54(5): 2138–2146.
- 7 J Fuchs, G Malka, J C Adam, *et al.*. Dynamics of subpicosecond relativistic laser pulse self-channeling in an underdense preformed plasma [J]. *Phys Rev Lett*, 1998, 80(8): 1658–1661.
- 8 M Borghesi, A J Mackinnon, R Gaillard, *et al.*. Large quasistatic magnetic fields generated by a relativistically intense laser pulse propagating in preionized plasma [J]. *Phys Rev Lett*, 1998, 80(23): 5137–5141.
- 9 M Tatarakis, A Gopal, I Watts, *et al.*. Measurements of ultrastrong magnetic fields during relativistic laser plasma interactions [J]. *Physics of Plasmas*, 2002, 9(4): 2244–2250.
- 10 Z Najmudin, M Tatarakis, A Pukhov, *et al.*. Measurements of the inverse faraday effect from relativistic laser interactions with an underdense plasma [J]. *Phys Rev Lett*, 2001, 87(21): 215004.
- 11 S C Wilks, A B London, T E Cowan, *et al.*. Energetic proton generation in ultra-intense laser-solid interactions [J]. *Phys Plasmas*, 2001, 8(2): 542–549.
- 12 M Kaluza, J Schreiber, M I K Santala, *et al.*. Influence of the laser prepulse on proton acceleration in thin-foil experiments [J]. *Phys Rev Lett*, 2004, 93(4): 045003.
- 13 A Pukhov. Three-dimensional simulations of ion acceleration from a foil irradiated by a short-pulse laser [J]. *Phys Rev Lett*, 2001, 86(16): 3562–3565.
- 14 Y Sentoku, K Mima, Sheng Zhengming, *et al.*. Three-dimensional particle-in-cell simulations of energetic electron generation and transport with relativistic laser pulses in overdense plasmas [J]. *Phys Rev E*, 2002, 65(5): 046408.
- 15 Yin Yan, Chang Wenwei, Ma Yanyun, *et al.*. Energetic ions generation in the interaction between ultrashort ultraintense laser pulse and solid target [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(6): 741–744.
- 银燕, 常文蔚, 马燕云, 等. 超短脉冲超强激光与固体靶相互作用中高能离子的产生[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(6): 741–744.
- 16 Li Yutong, Zhang Jie, Lu Xin, *et al.*. Forward dynamics of water plasmas generated by femtosecond laser pulses [J]. *Phys Plasmas*, 2002, 9(9): 4028–4031.
- 17 A Abudurexiti, T Okada, S Ishikawa. A mechanism for self-generated magnetic fields in the interaction of ultra-intense laser pulses with thin plasma targets [J]. *Physics of Plasmas*, 2009, 16(1): 91–98.
- 18 T Okada, K Ogawa. Saturated magnetic field for weibel instability in ultraintense laser-plasma interactions [J]. *Journal of Plasma Physics*, 2007, 77(7): 072702.
- 19 A Abudurexiti, A Zaker, P Tuniyazi. Effect of plasma density scale length on energetic protons generation in laser-plasma interaction [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(8): 083201.
- 阿不都热苏力, 艾尔肯·扎克尔, 帕尔哈提·吐尼亚孜. 激光等离子体密度标长对高能质子加速的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(8): 083201.

栏目编辑: 史敏