

# 超短脉冲圆极化激光场的一阶修正描述及加速效应

张绍银 许长谭 艾树涛

(临沂师范学院物理系凝聚态物理研究所, 山东 临沂 276005)

**摘要** 研究了超短脉冲圆极化激光场的一阶修正场,通过数值计算,探讨了入射电子的动力学特性,发现了超短脉冲圆极化激光场中的加速现象。通过研究电子的动力学特性与脉宽的关系发现,近轴近似方程在利用  $1/\omega$  归一化后,脉宽  $\tau_0 \leq 30$  时( $\omega$  为激光频率),仍然适用;而在脉宽  $\tau_0 > 30$  时,近轴近似方程与一阶修正方程的计算结果出现偏离。在事例  $\tau_0 = 100$  和  $\tau_0 = 300$  中,采用一阶修正场方程,研究了电子束团的能量分布与空间分布的特征,发现在脉宽  $\tau_0 = 300$  的情况下,加速电子数目增多,而且电子束能够发生汇集。

**关键词** 激光技术; 超短脉冲圆极化激光场; 一阶修正; 数值模拟; 激光俘获加速机制

**中图分类号** O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092906.1586

## First-Order Correction Field of Circularly Polarized Ultra-Short Pulse and Its Acceleration Effect

Zhang Shaoyin Xu Changtan Ai Shutao

(*Institute of Condensed Matter Physics, Department of Physics, Linyi Normal University, Linyi, Shandong 276005, China*)

**Abstract** The first-order correction to the field of ultra-short circularly polarized laser was studied. This theory was used to study the dynamics characteristics of incident electron in the circularly polarized intense laser pulse field, and the acceleration phenomenon was found. For the pulse duration  $\tau_0 \leq 30$ , where  $\tau_0$  is normalized by  $1/\omega$  and  $\omega$  is the laser frequency, the paraxial approximation is basically consistent with the first-order correction. But when  $\tau_0 > 30$ , the paraxial approximation deviates from the first-order correction. The electron bunch acceleration effect was also confirmed by using the first-order correction when  $\tau_0 = 100$  and  $\tau_0 = 300$ . At last, the energy distribution spatial distribution and as to the pulse duration was obtained. It is also found that the amount of acceleration electrons increases and these electrons can gather under  $\tau_0 = 300$ .

**Key words** laser technique; ultra-short circularly polarized laser; first-order correction; numerical simulation method; capture and acceleration mechanism

## 1 引 言

超短激光脉冲技术得到飞速发展<sup>[1~3]</sup>,其聚焦光强可达到  $10^{21}$  W/cm<sup>2</sup>,如此高强度的激光脉冲可用来研究相对论领域光和物质的相互作用<sup>[4~7]</sup>。如,超短 X 射线激光的产生、激光粒子加速、实验室天体物理学以及快点火等研究领域。

文献[8]基于自由电子在线极化高斯光场中运动的数值计算,考察了电子在强激光场中的非弹性散射及加速效应。结果发现,当光场很强时,在满足

一定入射条件下,电子可以被激光束俘获并猛烈加速至十亿电子伏特的能量级;电子的输出能量与激光的强度呈线性关系。这种真空激光加速电子的物理机制,即俘获加速(CAS)机制<sup>[8,9]</sup>,是一种全新的激光加速机制。CAS 具有加速梯度高、加速尺度小、入射电子能量要求低等特点,如果能够被实验所证实,那么就很可能发展成为非常有前景的新型台式高能电子激光加速器。在激光强度比较低的条件下,已有实验观察到将真空中自由电子加速到几分

收稿日期: 2008-11-03; 收到修改稿日期: 2009-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(10076002)和山东省自然科学基金(Y2007A01)资助课题。

作者简介: 张绍银(1966—),男,副教授,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。E-mail: shaoyinzhang@163.com

之一电子伏特和几千电子伏特能量的报道,而后又进一步观测到电子从激光场中获得 100 keV 的加速能量。1998 年,法国的 G. Malka 等已经从实验上观测到千电子伏特的电子被加速到兆电子伏特量级<sup>[10]</sup>。

目前超强激光脉冲的宽度已发展到飞秒量级甚至是光波周期的量级,而通用的描述仍采用长脉冲近似方法,因此有必要对超短脉冲进行精确的描述,并进一步研究它对电子动力学行为的影响。文献[11,12]已经研究了长脉冲下的圆极化激光场对电子的作用规律,而对于超短脉冲的情况,有待进一步研究。本文在已有研究的基础上,给出圆极化超短脉冲激光场的一阶修正解,再研究电子在圆极化超短脉冲激光修正场中的动力学过程。

## 2 超短脉冲圆极化激光场的表达形式

一般采用脉冲激光的描述方法为,在近轴近似激光场表达式的基础上添加相同的时间因子项  $f(ct-z) = \exp[-(t-z/c)^2/\tau_0^2]$ ,其中  $\tau_0$  为脉冲长度,即可得到圆极化脉冲激光场的近轴近似解。

由于超短脉冲激光场存在一定的频谱分布,不再是简单的单色场,就必须对其进行修正。文献[13]给出了超短线极化脉冲激光场的一阶修正解,据此推出圆极化的一阶修正解。

据频域积分的泰勒展开近似方法<sup>[13]</sup>及对称性可得,沿  $y$  轴极化的线极化场一阶修正场方程为

$$\begin{aligned} E_{x_1} &= 0, \\ E_{y_1} &= [1 + \varepsilon\sigma\Theta(2\zeta i + 2\zeta\rho^2\Theta)]E_{x_0}, \\ E_{z_1} &= s(-2\Theta)\eta[1 + \varepsilon\sigma\Theta(2\zeta i + 1 + 2\zeta\rho^2\Theta)]E_{x_0}, \\ cB_{x_1} &= [1 + \varepsilon\sigma\Theta(2\zeta i + 2\zeta\rho^2\Theta)]E_{x_0} + \\ & \quad s^2(-2\rho^2\Theta^2 + 4\Theta^2\eta^2) \times \\ & \quad [1 + \varepsilon\sigma\Theta(2\zeta i + 2 + 2\zeta\rho^2\Theta)]E_{x_0}, \\ cB_{y_1} &= s^2(-4\xi\eta\Theta^2) \times [1 + \varepsilon\sigma\Theta(2\zeta i + \\ & \quad 2 + 2\zeta\rho^2\Theta)]E_{x_0}, \\ cB_{z_1} &= -2s\xi\Theta[1 + \varepsilon\sigma\Theta(2\zeta i + 1 + \\ & \quad 2\zeta\rho^2\Theta)]E_{x_0}, \end{aligned} \quad (1)$$

结合沿  $x$  轴极化的线极化场一阶修正场<sup>[13]</sup>,推出圆极化超短激光脉冲的一阶解:

$$\begin{aligned} E_{x_1} &= [1 + \varepsilon\sigma\Theta(2\zeta i + 2\zeta\rho^2\Theta)]E_{x_0}, \\ E_{y_1} &= \pm iE_{x_1}, \\ E_{z_1} &= s(-2\Theta)(\xi \pm i\eta)[1 + \varepsilon\sigma\Theta \times \\ & \quad (2\zeta i + 1 + 2\zeta\rho^2\Theta)]E_{x_0}, \\ cB_{x_1} &= \pm i[1 + \varepsilon\sigma\Theta(2\zeta i + 2\zeta\rho^2\Theta)]E_{x_0} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & s^2(-4\xi\eta\Theta^2 - 2(\pm i)\rho^2\Theta^2 \pm 4i\Theta^2\eta^2) \times \\ & [1 + \varepsilon\sigma\Theta(2\zeta i + 2 + 2\zeta\rho^2\Theta)]E_{x_0}, \\ cB_{y_1} &= [1 + \varepsilon\sigma\Theta(2\zeta i + 2\zeta\rho^2\Theta)]E_{x_0} + \\ & s^2(-4(\pm i)\xi\eta\Theta^2 - 2\rho^2\Theta^2 + 4\Theta^2\xi^2) \times \\ & [1 + \varepsilon\sigma\Theta(2\zeta i + 2 + 2\zeta\rho^2\Theta)]E_{x_0}, \\ cB_{z_1} &= -2s\eta\Theta[1 + \varepsilon\sigma\Theta(2\zeta i + 1 + \\ & \quad 2\zeta\rho^2\Theta)]E_{x_0} - 2(\pm i)s\xi\Theta[1 + \varepsilon\sigma\Theta(2\zeta i + \\ & \quad 1 + 2\zeta\rho^2\Theta)]E_{x_0}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $\xi = x/w_0$ ,  $\eta = y/w_0$ ,  $\rho^2 = \xi^2 + \eta^2$ ,  $\zeta = z/k_0w_0^2$ ,  $\Theta = 1/(i + 2\zeta)$ ,  $\sigma = (t - z/c)/(\tau_0/\sqrt{2})$ ,  $\varepsilon = 1/(\omega_0\tau_0/\sqrt{2})$ ,  $s = 1/k_0w_0$ 。表达式中的“ $\pm$ ”号分别表示右、左旋圆极化激光。

由(2)式得到零阶修正场的解为

$$\begin{aligned} E_{x_0} &= E_x f(ct - z), \\ E_{y_0} &= \pm iE_{x_0}, \\ E_{z_0} &= s(-2\Theta)(\xi \pm i\eta)E_{x_0}, \\ cB_{x_0} &= \pm iE_{x_0} + s^2[-4\xi\eta\Theta^2 - \\ & \quad 2(\pm i)\rho^2\Theta^2 \pm 4i\Theta^2\eta^2]E_{x_0}, \\ cB_{y_0} &= E_{x_0} + s^2[-4(\pm i)\xi\eta\Theta^2 - \\ & \quad 2\rho^2\Theta^2 + 4i\Theta^2\xi^2]E_{x_0}, \\ cB_{z_0} &= -2s\eta\Theta E_{x_0} - 2(\pm i)s\xi\Theta E_{x_0}. \end{aligned} \quad (3)$$

可以看出,零阶的修正场即为圆极化激光脉冲的近轴近似解,根据推导,研究圆极化激光脉冲的加速效应。

电子在激光场中的运动遵循相对论的牛顿-洛伦兹方程

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = -e(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (4)$$

其标量方程为

$$\begin{aligned} \frac{dp_x}{dt} &= -e(E_x + v_y B_z - v_z B_y), \\ \frac{dp_y}{dt} &= -e(E_y + v_z B_x - v_x B_z), \\ \frac{dp_z}{dt} &= -e(E_z + v_x B_y - v_y B_x). \end{aligned} \quad (5)$$

在给定光场场强分量及电子初始条件情况下,利用龙格-库塔法编程,采用数值逼近的方法求解标量方程,得到任意时刻的电子动量( $p_x, p_y, p_z$ )。根据狭义相对论质能关系,得任意时刻的电子能量为,  $E = \sqrt{m_0^2 c^4 + p_x^2 c^2 + p_y^2 c^2 + p_z^2 c^2}$ ,任意时刻的电子速度  $\mathbf{v} = \frac{\mathbf{p}}{\gamma m_0}$ ,其中  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ 。

为了便于计算,采用统一的约化单位,长度单位为  $1/k$ ,时间单位为  $1/\omega$ ,速度单位为  $c$ ,动量单位为  $m_e c$ ,电量单位为  $e$ 。

### 3 结果与讨论

已有的研究中,基于长脉冲近似的激光脉冲表达式,发现了圆极化激光的 CAS 加速机制仍然存在。采用超短脉冲右圆极化激光场的修正描述,通过三维的粒子模拟程序,进一步研究电子和超短激光脉冲场作用的动力学特性。

由图 1(a)一阶修正场中激光场的相速度与电子的速度比较,可以看出在距离激光束中心附近几个瑞利长度的范围内,即激光加速起决定作用的范围内,仍然有关系  $v_\varphi < v_e$ ,且在低相速度区内相滑移有一个缓慢过程,如图 1(b)所示。图 1 中采用参数为:激光场强度  $a_0 = 10$ ,光束腰宽  $k\omega_0 = 50$ ,脉宽  $\tau_0 = 20$ ,入射动量  $p_{x0} = 0.0001, p_{y0} = 0, p_{z0} = 0.001$ ,  $\varphi_0 = 90$ 。据文献[14,15]可知,CAS 加速机理在超短圆极化修正场中依然成立。

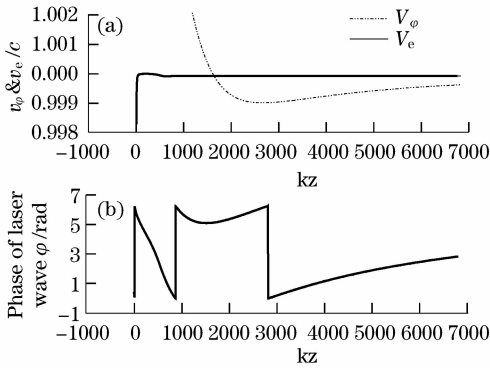


图 1 一阶修正场中电子速度  $v_e$ 、激光场的相速度  $v_\varphi$  和相位  $\varphi$

Fig. 1 Demonstration of electron velocity  $v_e$ , phase velocity  $v_\varphi$  and the phase  $\varphi$  in the first-order field

为研究近轴近似场的适用范围,进一步进行了数值模拟,将两种场方程的计算结果进行比较。

图 2 给出  $\tau_0 = 20$  时,超短圆极化光近轴近似与一阶修正条件下 CAS 电子的能量和动力学的轨迹,可以看出两种情况下,电子能量和轨迹的变化特征基本相符。图 2 中采用参数为,激光场强度  $a_0 = 10$ ,光束腰宽  $k\omega_0 = 50$ ,脉宽  $\tau_0 = 20$ ,入射动量  $p_{x0} = 0.0001, p_{y0} = 0, p_{z0} = 0.001$ ,  $\varphi_0 = 70$ ,实线表示一阶修正结果,虚线表示近轴近似结果。

图 3(a), (b), (c)分别给出了脉宽为 20,30 和 300 的近轴近似场和一阶修正场情况下,电子输出

能量随初相位的变化情况。图 3(a)中采用参数为,激光场强度  $a_0 = 10$ ,光束腰宽  $k\omega_0 = 50$ ,脉宽  $\tau_0 = 20$ ,入射动量  $p_{x0} = 0.0001, p_{y0} = 0, p_{z0} = 0.001$ ; (b) 中  $\tau_0 = 30$ ,其它参数同(a); (c) 中  $\tau_0 = 300$ ,其他参数同(a)。图中实线表示一阶修正结果,点线表示近轴近似结果。

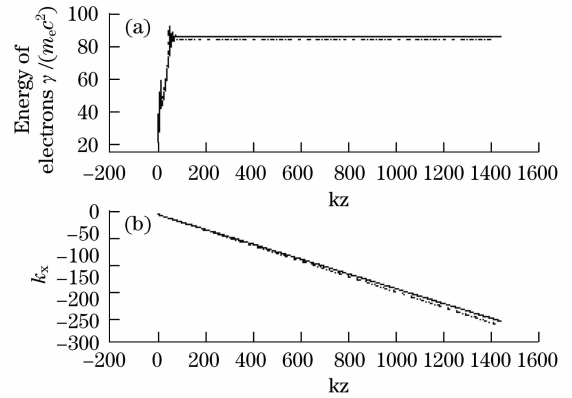


图 2 近轴近似与一阶近似场下的俘获加速电子能量和轨道比较

Fig. 2 Comparison of the electron energy and trajectory in the paraxial approximation and the first-order field

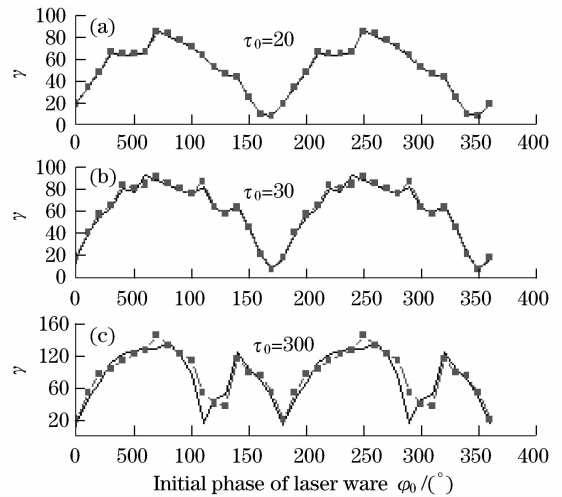


图 3 近轴近似与一阶近似场中电子输出能量随初相位的变化

Fig. 3 Final electron energy versus initial laser phase in paraxial and the first-order fields approximations

通过计算表明,在  $\tau_0 \leq 30$  的范围内,一阶修正的结果与近轴近似的结果符合得较好;在长脉冲范围内,  $\tau_0 > 30$  时,如图 3 所示,近轴近似与一阶修正稍有偏离。得出结果,在短脉冲的范围内,即  $\tau_0 \leq 30$  时,对圆极化激光,近轴近似场方程仍然可以适用。

采用一阶修正模型,继续研究短脉冲圆极化激光场对电子束团的作用规律。假定电子束团状的外型轮廓为椭球形,具有和激光脉冲相同的尺

寸,即长轴等于激光脉冲长度  $\tau_0$ ,短轴的大小等于激光脉冲的腰宽  $k\omega_0$ 。束团中的电子具有相同的入射初始能量,在空间均匀分布,电子间的相互作用忽略。取输出电子的横向散射角为  $\theta_t = \arctan(\sqrt{P_{xf}^2 + P_{yf}^2}/P_{zf})$ ,从图 4(a)可以看出,在较小脉宽( $\tau_0=100$ )的情况下,电子束团的输出能量随着横向散射角的分布,最终电子束的能量分布发生了分叉现象,能量较高的电子和能量较小的电子明显分离,这是因为在脉宽较小的情况下,电子的非弹性散射(IS)较明显,CAS 电子的数目较少。图 4(a)中采用参数为,激光场强度  $a_0=10$ ,光束腰宽  $k\omega_0=50$ ,脉宽  $\tau_0=100$ ,入射电子能量  $\gamma_0=20.12$ ,电子束团含 1200 个电子。从图 5(a)可以看出,输出电子束的空间分布,电子束的分叉现象与图 4(a)一致。图 5(a)采用参数与图 4(a)相同。

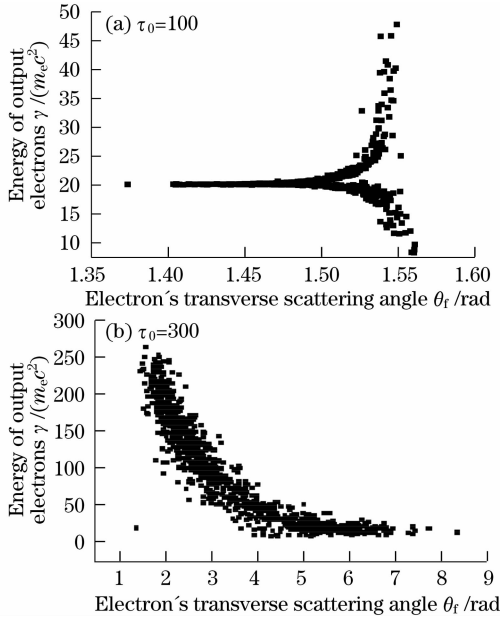


图 4 一阶近似场下的电子束团能量随横向散射角的分布  
Fig. 4 Distribution of electron bunch energy versus their transverse scattering angle in the first-order field

从图 4(b)可以看出,随着脉宽的增加,加速电子的数量比例增大,有更多的电子获得加速的机会,而且高能电子的横向散射角较小,反映了 CAS 电子能够向一个方向集中,这便于高能电子输出。图 4(b)中采用参数为,激光场强度  $a_0=10$ ,光束腰宽  $k\omega_0=50$ ,脉宽  $\tau_0=300$ ,入射电子能量  $\gamma_0=20.12$ ,电子束团含 2000 个电子。

电子的空间分布如图 5(b)所示,能量较高的电子能够聚集于束团的一侧。图 5(b)采用参数与图 4(b)相同。可以将出射电子束团的特点归纳为,输出的 CAS 电子组成高能束,运动在束团的前端,具

有较小的发散角,在空间比较聚集;而 IS 电子则只有较低的能量,较大的发散角,在空间扩散得比较严重。

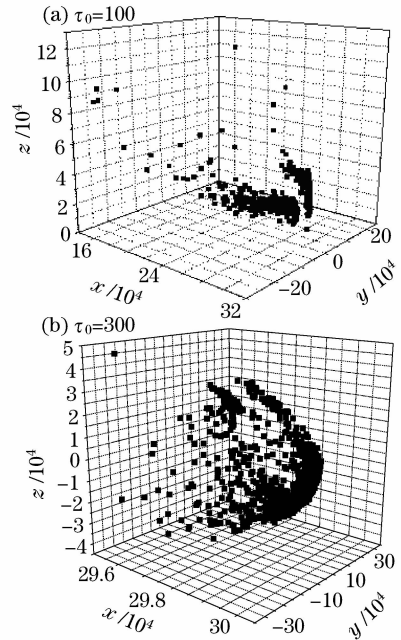


图 5 一阶近似场下的电子束团空间分布  
Fig. 5 Spatial distribution of the electron bunch in the first-order field

根据文献[16],脉冲的长度不是越长越理想,在紧聚焦情况下,强激光束的衍射效应较明显,此时脉宽继续增大到一定程度,CAS 机制的效果并不理想,这个原因为,长脉冲场中电子与激光发生作用,受激光束边缘场的衍射影响较大,使电子束被加速的效率降低。

### 4 结 论

研究了圆极化短脉冲激光场方程的一阶修正表达式,讨论了短脉冲下电子的动力学特性,并对近轴近似描述和一阶修正进行了比较发现,圆极化脉冲激光场,在脉宽较小时,近轴近似与一阶修正符合得较好。依据一阶近似修正,研究了短脉冲  $\tau_0=100$  和 300 下的电子束团的能量特性和空间特性,该结果对展开圆极化激光加速的研究,具有参考作用。

### 参 考 文 献

- 1 Perry M D, Mourou G. Terawatt to petawatt subpicosecond lasers[J]. *Science*, 1994, **264**(5161): 917~924
- 2 Mourou G A, Barty C P J, Perry M D. Ultrahigh-intensity lasers: physics of the extreme on a tabletop[J]. *Phys. Today*, 1998, **51**(11): 22~28
- 3 Perry M D, Pennington D, Stuart B C *et al.*. Petawatt laser pulses[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(3): 160~162

- 4 Yugami N, Kikuta K, Nishida Y. Electron acceleration by a transverse electromagnetic wave supplemented with a crossed static magnetic field[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **76**(10): 1635~1638
- 5 Chen Jing, Xu Zhi-Zhan, Zeng Zhi-Nan. High-Order harmonic generation from multi-atom molecular ion in an ultra-short laser field[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1):1~5  
陈 静,徐至展,曾志男. 一维多原子分子离子与超短激光场作用产生的高次谐波[J]. *光学学报*, 2003, **23**(1):1~5
- 6 Zhong Rutao, Tang Xiahui, Qin Yingxiong *et al.*. Higher power CO<sub>2</sub> laser welding technology for sandwich diamond saw[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(3): 432~437  
钟如涛,唐霞辉,秦应雄 等. 高功率 CO<sub>2</sub> 激光焊接三明治金刚石锯片[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 432~437
- 7 Guo Xiao-dong, Li Ru-xin, Yu Bing-kun *et al.*. Femtosecond laser pulses induced nanostructures on ZnO in different ablation conditions[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 1017~1020  
郭晓东,李儒新,余昊鲲 等. 不同烧蚀条件下飞秒激光脉冲诱导 ZnO 纳米结构研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 1017~1020
- 8 Ho Y K, Wang J X, Feng L *et al.*. Electron scattering by intense continuous laser beam[J]. *Phys. Lett. A*, 1996, **220**(4): 189~193
- 9 Pang J, Ho Y K, Yuan X Q *et al.*. Subluminous phase velocity of a focused laser beam and vacuum laser acceleration[J]. *Phys. Rev. E*, 2002, **66**(6): 066501-1~4
- 10 Malka G, Lefebvre E, Miquel J L. Experimental observation of electrons accelerated in vacuum to relativistic energies by a high-intensity laser[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(17): 3314~3317
- 11 Shao Lei, Huo Yu-Kun, Cao Na *et al.*. Investigation of electron injection parameters in vacuum laser acceleration[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2003, **20**(8):1251~1253
- 12 Xu J J, Ho Y K, Kong Q *et al.*. Properties of electron acceleration by a circularly polarized laser in vacuum[J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **98**(5): 056105-1~3
- 13 Hua J F, Ho Y K, Lin Y Z *et al.*. High-order corrected fields of ultrashort, tightly focused laser pulses[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(17):3705~3707
- 14 Pang J, Ho Y K, Cao N *et al.*. Intensity threshold in vacuum laser acceleration[J]. *Appl. Phys. B*, 2003, **76**(5): 617~620
- 15 Xie Y J, Ho Y K, Cao N *et al.*. Subluminous phase velocity regions of an accurately described Gaussian laser field And laser-driven acceleration[J]. *Phys. Lett. A*, 2003, **318**(1): 15~20
- 16 Yan Z, Ho Y K, Wang P X *et al.*. Accurate description of ultra-short tightly focused Gaussian laser pulses and vacuum laser acceleration[J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **81**(6): 813~819