

文章编号: 0253-2239(2005)11-1506-4

激光脉冲宽度对有质动力加速电子的影响

张 淼¹ 余 玮² 林尊琪¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800
² 中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800)

摘要: 基于真空中单电子运动模型, 编程计算得到了高斯激光脉冲与初始位于激光传播轴上电子的相互作用结果。不同激光参量条件下, 得到了电子的能量增益与激光强度、焦斑大小和脉冲宽度关系。结果表明, 高斯激光脉冲焦斑较大时, 电子没有明显的能量增益, 高斯激光脉冲焦斑太小时, 电子也没有明显的能量增益。电子的能量增益有一个最佳焦斑大小。在相同激光强度下, 电子能量增益的最佳焦斑大小随脉冲宽度的增大而增大, 但最佳焦斑大小与脉冲宽度的比值基本上是不变的。

关键词: 激光光学; 电子加速; 有质动力; 单电子运动模型

中图分类号: TN241 文献标识码: A

Pulse Duration Effect on the Ponderomotive Accelerating Electron

Zhang Miao¹ Yu Wei² Lin Zunqi¹

(¹ National Laboratory on High-Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800
² State Key Laboratory of High-Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract: Electron acceleration from the interaction of a Gaussian laser pulse with initial axial electron is investigated, using a single test electron model in vacuum. Under the different laser parameters, the electron energy gain depends on the laser intensity, focal spot size and pulse width. The electron energy gain have a optimum focal spot size. There are no evident energy gain when the focal spot size is too big or small. Given the laser intensity, the optimum focal size increases with the pulse width, and the ratio of the optimum focal size to the pulse width is fixed.

Key words: laser optics; electron acceleration; ponderomotive force; single test electron model

1 引 言

啁啾脉冲放大(CPA)技术^[1,2]使激光脉冲的峰值强度提高了几个数量级, 脉宽也由皮秒缩至飞秒, 聚焦在很小的空间内, 光强可以超过 10^{21} W/cm², 电场也可以超过 10^{12} V/m。激光脉冲可在真空^[3~7]和等离子体内^[8~14]加速而得到高能电子^[9,10,15]。平面波脉冲的作用下, 虽然脉冲的上升沿加速电子获得大的能量, 但是脉冲的下降沿会对电子减速, 加速和减速作用相互抵消, 无法加速电子。Hartemann等^[5]提出了非线性有质动力散射电子加速的方法。使用聚焦的激光脉冲, 脉冲的横向强度呈高斯分布。如果电子在光电场作用下的振幅和光脉冲的焦斑大小可比拟, 当电子在振动过程中离开光脉冲传播轴

最大振幅时, 由于此处光强远小于轴上的光强, 光电场不能把电子拉回到初始位置, 电子就会被光脉冲从侧向散射出去, 同时获得一定能量。为了使电子的振幅能够和光脉冲的焦斑大小相当, 对光强有一要求, 称之为临界光强。然而实验^[15]和模拟^[6]都表明, 在远低于临界光强的光脉冲作用下, 电子也可以被光脉冲散射出去。Yu等^[7]忽略电子在光电场作用下所做的高频振动, 只考虑电子在光场有质动力作用下的平均运动。径向的有质动力把电子向远离激光传播轴的方向排开, 使得电子只与脉冲的上升沿作用, 在脉冲下降沿减速电子之前, 电子就已经与光脉冲分离, 从而获得了能量增益。这一理论很好地解释了实验和模拟的结果^[16]。

作者简介: 张 淼(1980~), 男, 山东人, 中国科学院上海光学精密机械研究所硕士研究生, 主要从事“快点火”中快电子物理特性的研究。E-mail: shhzhm@eyou.com

收稿日期: 2004-10-28; 收到修改稿日期: 2005-03-01

本文基于单电子在真空中运动的理论模型,编程数值计算得到了横向强度呈高斯分布的激光脉冲与初始位于激光传播轴上的电子相互作用结果。得到激光脉冲能量转化为电子能量的份额最大时,激光脉冲参量应满足的关系。

2 控制方程

单电子在激光场内运动的拉格朗日方程^[7]如下:

$$d_t(\mathbf{p} - \mathbf{a}) = -\nabla_a(\mathbf{a} \cdot \mathbf{u}), \quad (1)$$

$$d_t\gamma = \mathbf{u} \cdot \partial_a \mathbf{a}, \quad (2)$$

其中 $\mathbf{u} = \mathbf{U}/c$ 为电子规范化速度, \mathbf{U} 为电子速度, $\mathbf{a} = \mathbf{A}e/mc^2$ 为激光规范化矢势, \mathbf{A} 为激光矢势, $\mathbf{p} = \gamma\mathbf{u}$ 为电子规范化动量, γ 为相对论因子也可称为规范化能量, ∇_a 表示只对 \mathbf{a} 作用。

真空中高斯型聚焦激光脉冲的规范化矢势可表示为

$$\mathbf{a} = a_0 \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{r_0^2} - \frac{(z-t)^2}{L^2}\right] \times$$

$$[\cos(t-z)\mathbf{x} + \delta\sin(t-z)\mathbf{y}] = a_x\mathbf{x} + a_y\mathbf{y},$$

L 和 r_0 分别为规范化脉冲长度和焦斑大小, a_0 为峰值振幅, δ 表示激光的偏振态, $\delta = 0, 1, -1$ 分别表示线偏振, 右旋圆偏振, 左旋圆偏振。

$$a_x = a_0 \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{r_0^2} - \frac{(z-t)^2}{L^2}\right] \cos(t-z), \quad (3)$$

$$a_y = \delta a_0 \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{r_0^2} - \frac{(z-t)^2}{L^2}\right] \sin(t-z), \quad (4)$$

电子的运动方程可写为:

$$d_t(\gamma u_x - a_x) = -\mathbf{u} \cdot \partial_x \mathbf{a}, \quad (5)$$

$$d_t(\gamma u_y - a_y) = -\mathbf{u} \cdot \partial_y \mathbf{a}, \quad (6)$$

$$d_t(\gamma u_z) = -\mathbf{u} \cdot \partial_z \mathbf{a}, \quad (7)$$

$$d_t\gamma = -\mathbf{u} \cdot \partial_a \mathbf{a}, \quad (8)$$

整理可得到

$$\begin{cases} \frac{d(\gamma u_x)}{dt} = \frac{\partial a_x}{\partial t} + u_y \left(\frac{\partial a_x}{\partial y} - \frac{\partial a_y}{\partial x} \right) + u_z \frac{\partial a_x}{\partial z}, \\ \frac{d(\gamma u_y)}{dt} = \frac{\partial a_y}{\partial t} + u_x \left(\frac{\partial a_y}{\partial x} - \frac{\partial a_x}{\partial y} \right) + u_z \frac{\partial a_y}{\partial z}, \\ \frac{d(\gamma u_z)}{dt} = -u_x \frac{\partial a_x}{\partial z} - u_y \frac{\partial a_y}{\partial z}, \\ \frac{d\gamma}{dt} = u_x \frac{\partial a_x}{\partial t} + u_y \frac{\partial a_y}{\partial t}, \end{cases} \quad (9)$$

上述方程组(9)决定了电子在激光场内的运动规律。此方程组为普通的微分方程组,给定不同的激光参量和电子的初始条件,通过龙格-库塔(Runge-Kutta)方法数值求解,可得到电子的轨迹以及能量。

3 计算结果

数值计算 $\delta = 1$ 右旋圆偏振激光加速电子的情况。假设激光波长为 λ , 初始时刻 $t = 0$ 时, 高斯脉冲峰值位置 $z = 0$ 。为了保证在初始状态, 电子未被激光场扰动, 电子在 z 方向初始位置 $z_0 = 4L$ 。

图 1(a)、图 1(b) 分别为电子的运动轨迹和电子的运动能量随时间 t 的变化关系, 对应的激光参量: $a_0 = 4, L = 10, r_0 = 20\lambda$, 电子的初始位置 $(0, 0, z_0)$, 初始时刻电子静止 $\gamma_0 = 1$ 。图 1(c)、图 1(d) 所示为 $r_0 = 5$, 其他参量与图 1 相同, 电子的运动轨迹和电子的运动能量随时间 t 的变化关系。图 1(a)、图 1(b) 中电子在激光脉冲的上升沿被加速、在下降沿被减速, 脉冲通过以后电子还在激光的传播轴上, 电子能量没有增益, $\Delta\gamma \approx 0$; 图 1(c)、图 1(d) 中电子在激光脉冲的上升沿被加速后, 没有通过下降沿, 就被横向有质动力排出, 其轨迹明显偏离激光的传播轴, 有明显的能量增益, $\Delta\gamma \approx 7$ 。这说明聚焦激光脉冲的焦斑大小对电子的加速有很大的影响。

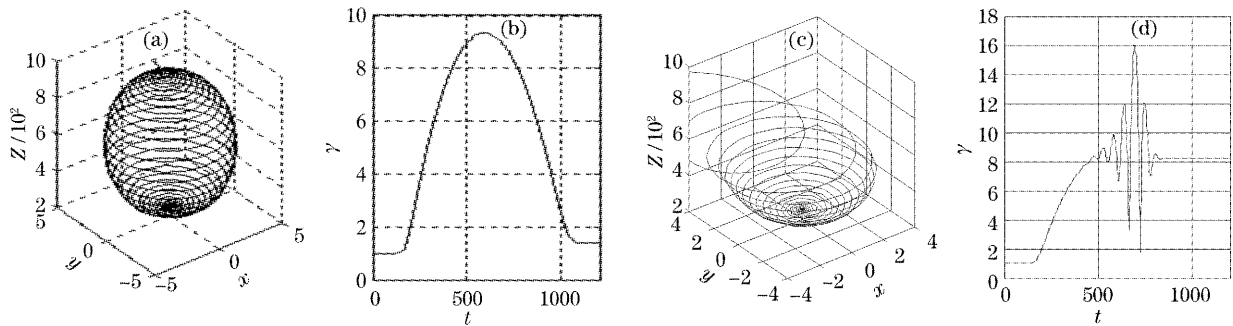


图 1 (a) $\gamma_0 = 20\lambda$, (c) $\gamma_0 = 5\lambda$ 时电子在光场中的运动轨迹和 (b) $\gamma_0 = 20\lambda$, (d) $\gamma_0 = 5\lambda$ 时电子能量随时间的变化。

Fig. 1 Electron trajectory in a circular polarized Gaussian pulse electromagnetic wave (a) $\gamma_0 = 20\lambda$, (c) $\gamma_0 = 5\lambda$, and electron's energy during the interaction (b) $\gamma_0 = 20\lambda$, (d) $\gamma_0 = 5\lambda$

图 2 为 $L=10\lambda$, 不同的激光强度 a_0 情况下, 电子逃离激光场后的最终能量对激光焦斑大小的依赖关系。实线、虚线、点线分别对应 $a_0=2, 3, 4$ 。

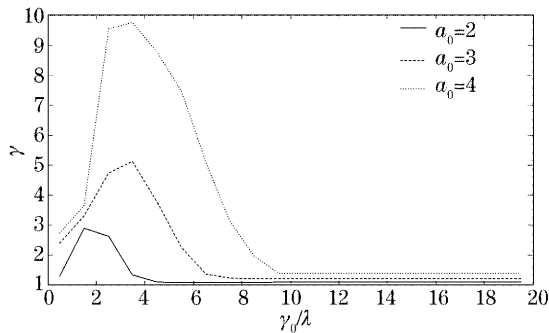


图 2 电子的能量增益与激光焦斑大小的关系
Fig. 2 Electron retain energy γ as a function of focus size r_0

由图可见, 电子能量增益作为激光焦斑大小的函数, 有峰值出现。最大能量增益随激光强度的增大而增大。 $a_0=2, 3, 4$, 相应的最大能量增益 $\gamma_{\max}=3, 5, 10$; 峰值位置处的焦斑大小随激光强度的增大

而增大。 $a_0=2, 3, 4$, 相应的峰值位置处的焦斑大小 $r_0=1.8\lambda, 3.8\lambda, 4\lambda$ 。当激光焦斑较大时, 电子如同在平面脉冲中一样, 经历先加速后减速的过程, 最终没有获得显著的能量增益; 当激光焦斑较小时, 电子在到达激光脉冲峰以前就被横向有质动力排出, 由于未得到充分加速, 其能量增益也不大。对一定的激光强度与脉宽, 存在一个最佳焦斑半径, 在脉冲峰附近被横向有质动力排出, 从而获得最大增益。

图 3 为不同激光脉冲宽度条件下, 电子的最终能量随 r_0/L 的变化关系, 图 3(a) $a_0=4$, 图 3(b) $a_0=6$ 。实线、虚线、点线、点虚线分别对应 $L=5\lambda, 10\lambda, 20\lambda, 30\lambda$ 。由图可见, 不同的脉冲宽度, 电子获得最大能量增益对应的 r_0/L 值基本一致。 $a_0=4$ 时, 电子最大能量增益都出现在 $r_0/L=0.4$ 处, $a_0=6$ 时, 电子最大能量增益都出现在 $r_0/L=0.5$ 处。激光强度一定, 不同的脉冲宽度, 电子获得最大能量增益对应的最佳焦斑大小是不同的, 随着脉冲宽度的增大, 最佳焦斑大小增大, 但最佳焦斑大小与脉冲宽度的比值基本不变, 并随着激光强度的增加而增加。

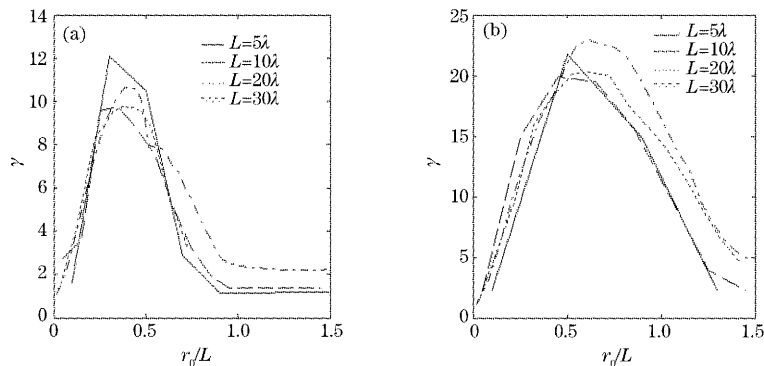


图 3 电子的能量增益与 r_0/L 的关系
Fig. 3 Electron retain energy γ as a function of r_0/L

4 结 论

电子在横向有质动力作用下逃离激光场后, 最终能量随激光强度的增大而增大。电子的能量增益对激光焦斑大小的依赖关系中, 存在一个最佳焦斑大小, 此焦斑大小随激光强度的增大而增大。激光脉宽对电子能量增益有影响, 在相同激光强度下, 电子获得的最大能量增益对应的激光焦斑大小随脉冲宽度的增大而增大, 但不同的脉冲宽度, 电子获得最大能量对应的焦斑大小与脉冲宽度的比值 r_0/L 基本上是不变的。并且这个比值随着激光强度的增加而增加。我们的结论, 对于激光加速电子, 尤其是对于“快点火”^[17]过程中快电子加速的研究有重要价

值。本文中电子初始位置是固定的。电子源有一定的空间分布, 群体电子的统计结果, 对后续的参量选择尤其重要, 有待于进一步研究。

参 考 文 献

- 1 Donna Strickland, Gerard Mourou. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. *Opt. Commun.*, 1985, **56**(3): 219~221
- 2 Li Wei, Lui Jiansheng, Zeng Zhinan *et al.*. Theoretical investigation of effect of pulse chirp on high-order harmonic spectrum[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(6): 509~511 (in Chinese)
李 伟, 刘建胜, 曾志男 等. 脉冲啾啾对高次谐波谱影响的理论研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(6): 509~511
- 3 Marlan O. Scully, M. S. Zubairy. Simple laser accelerator: Optics and particle dynamics[J]. *Phys. Rev. (A)*, 1991, **44**(4): 2656~2663

- 4 Eric Esarey, Phillip Sprangle, Jonathan Krall. Laser acceleration of electrons in vacuum[J]. *Phys. Rev. (E)*, 1995, **52**(5): 5443~5453
- 5 F. V. Hartemann, S. N. Fochs, G. P. Le Sage *et al.*. Nonlinear ponderomotive scattering of relativistic electrons by an intense laser field at focus[J]. *Phys. Rev. (E)*, 1995, **51**(5): 4833~4843
- 6 Brice Quesnel, Patrick Mora. Theory and simulation of the interaction of ultraintense laser pulses with electrons in vacuum [J]. *Phys. Rev. (E)*, 1998, **58**(3): 3719~3732
- 7 Wei Yu, M. Y. Yu, J. X. Ma *et al.*. Ponderomotive acceleration of electrons at the focus of high intensity lasers[J]. *Phys. Rev. (E)*, 2000, **61**(3): R2220~R2223
- 8 T. Tajima, J. M. Dawson. Laser electron accelerator[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1979, **43**(4): 267~270
- 9 D. Umstadter, S. Y. Chen, A. Maksimchuk *et al.*. Nonlinear optics in relativistic plasmas and laser wake field acceleration of electrons[J]. *Science*, 1996, **273**(5274): 472~475
- 10 R. Wagner, S. Y. Chen, A. Maksimchuk *et al.*. Electron acceleration by a laser wake field in a relativistically self-guided channel[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(16): 3125~3128
- 11 Phillip Sprangle, Eric Esarey, Jonathan Krall. Laser driven electron acceleration in vacuum, gases, and plasmas[J]. *Phys. Plasmas*, 1996, **3**(5): 2183~2190
- 12 Ji Peiyong, Bao Jiashan. Photon acceleration driven by an intense laser pulse[J]. *Chin. Phys.*, 2001, **10**(4): 314~319
- 13 Yuan Xiao, Yu Wei, Chen Zhaoyang *et al.*. Relativistic self-guiding of ultrashort laser pulse radiation in low density plasmas [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(2): 161~164 (in Chinese)
袁 孝,余 玮,陈朝阳等. 超强脉冲激光在低密度等离子体中的相对论自导引效应[J]. *光学学报*, 2002, **22**(2): 161~164
- 14 Yu Wei, Shen Baifei, Song Xiangyang *et al.*. Plasma boring of ultra-intense laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(11): 1662~1664 (in Chinese)
余 玮,沈白飞,宋向阳等. 超强激光的等离子体烧孔效应[J]. *光学学报*, 1996, **16**(11): 1662~1664
- 15 G. Malka, E. Lefebvre, J. L. Miquel. Experimental observation of electrons accelerated in vacuum to relativistic energies by a high-intensity laser[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(17): 3314~3317
- 16 He Feng, Yu Wei, Lu Peixiang *et al.*. Electron acceleration by a tightly focused femtosecond laser beam in vacuum [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(1): 165~170 (in Chinese)
何 峰,余 玮,陆培祥等. 紧聚焦的飞秒激光脉冲在真空中对电子的加速[J]. *物理学报*, 2004, **53**(1): 165~170
- 17 Max Tabak, James Hammer, Michael E. Glinsky *et al.*. Ignition and high gain with ultrapowerful lasers [J]. *Phys. Plasmas*, 1994, **1**(5): 1626~1634