

外加静电场的聚焦激光脉冲真空加速电子方案

黄仕华[†] 吴锋民

(浙江师范大学物理系, 金华 321004)

(2007 年 10 月 16 日收到 2008 年 9 月 4 日收到修改稿)

采用五阶修正的聚焦激光光场方程模拟研究了由 Singh 提出的在电子和激光脉冲作用尾部阶段施加外场的加速方案, 将 Singh 方案中采用的外加磁场改成了外加电场, 并且考虑了光束的纵向电场和光束衍射效应. 模拟结果显示, 电子可以从加速相位阶段被外场导入下一个加速相位阶段而不进入减速相位阶段, 因此电子能获得比不加外场方案更高的净能增益.

关键词: 强激光, 激光加速

PACC: 4260K, 2921

1. 引言

近年来, 随着强激光技术的迅速发展^[1-5], 激光加速带电粒子受到人们的普遍关注^[6-24]. 为了在真空中用强激光加速电子, 人们提出了许多加速方案^[10-27], 但由于电子和激光场间急剧的相滑移, 电子很难在离开激光场后仍保留它获得的能量. 外加静磁场和静电场常用来改变电子在光场中加速和减速的周期性振荡, 甚至在进入减速相位前从光场中强行导出^[28-31]. 最近, Singh^[29]提出了一个部分区域加载静磁场的方案, 分析和计算表明, 选择适当强度的静磁场加在电子和光脉冲作用尾部阶段, 电子能获得加速并在离开光场后保留获得的大部分能量. 需要指出的是, Singh 在文献 [29] 中采用的光场描述的场方程中没有考虑纵向电场, 也就是电磁场分量不满足自由空间中的 Maxwell 方程 $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$, 因而文献 [29] 得到的计算结果很难令人信服^[32, 33]. 文献 [33] 指出, 当考虑了纵向电场后, 计算结果会有很大的差异. 此外, 文献 [29] 中对脉冲光场的描述是用一个平面波乘以一个高斯型因子处理的, 也没有考虑光束传播的衍射效应, 它既不是波动方程的解也不是傍轴波动方程的解. 要研究聚焦光束驱动电子的加速情况, 光场的衍射效应必须加以考虑. 我们的研究发现, Singh 的方案不失为一个好方案, 因为即使考虑了高阶修正的光场方程, 电子还是能够获得较

大的净能增益. 然而, 产生高强度磁场的技术要求往往很高, 而得到同样偏转力度的电场则相对容易, 故本文采用外加电场对该方案进行了研究. 文献 [29] 对外加场的作用机制的解释是电子被加速后由于外场作用导出离开了光场而不致进入光场减速相位减速, 因此出射时保证了净能增益. 我们的研究发现, 即使电子没有离开光场, 由于外场的作用电子在光场中加速和减速的对称性被打破, 电子可以不进入减速相位阶段, 甚至被外场导入下一个加速相位阶段.

2. 计算模型

本文采用三维测试粒子模拟来研究电子在激光场中的动力学行为, 电子和激光脉冲作用过程如图 1 所示. 电子在光场中的动量和能量可以通过求解下列相对论 Newton-Lorentz 方程得到^[23]:

$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} = -e(\mathbf{E} + \boldsymbol{\beta} \times \mathbf{B}), \quad (1)$$

$$\frac{d\mathfrak{P}}{dt} = -e\boldsymbol{\beta} \cdot \mathbf{E}. \quad (2)$$

这里 $\boldsymbol{\beta}$ 是电子以 c 为单位的速度. 我们用四维的能量动量矢量来标注电子的状态 $(\mathfrak{P}, \mathbf{P})$, 其中动量 $\mathbf{P} = \gamma\boldsymbol{\beta}$ 的单位是 $m_e c$, 能量 $\mathfrak{P} = \gamma$ 的单位是 $m_e c^2$, $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ 是 Lorentz 因子, m_e 是电子的静质量. 本文中采用的时间单位是 $\frac{T}{2\pi}$ (T 是激光周期), 长度的

[†] E-mail: hsh@zjnu.cn

单位是 $\frac{\lambda}{2\pi}$ (λ 是激光波长). v_i 表示电子入射的初始速度, r_0 是电子初始位置到原点 ($x = y = z = 0$) 的距离, Z_L 是激光脉冲中心初始位置到原点的距离, $\Delta = Z_L - r_0$ 就是电子初始位置和激光脉冲中心初始位置间的距离. 外加静电场 E_a 加载区域为 $z > Z_m$, 方向沿 $+x$ 方向. 不失一般性, 假设脉冲中心在 $t = 0$

时刻到达原点. 计算开始时刻为 $t_{\text{begin}} = -\frac{Z_L}{c}$, 图 1 中 $t = t_E$ 表示电子进入外加静电场 E_a 加载区域的时刻, 当电子感受到的激光场电场振幅 $E_{\text{max}} < 10^{-10}$ 时终止计算. 在下面的计算中, 我们选择 $r_0 = 5 \times 10^4$ 相当于大约 80 nm (对应波长 $\lambda = 10 \mu\text{m}$), 相当于 $\Delta \approx 1081$ (对应 $\delta = 50$ 和 $\gamma_i = 5$, $Z_L = \frac{cr_0}{v_i} + \delta$).

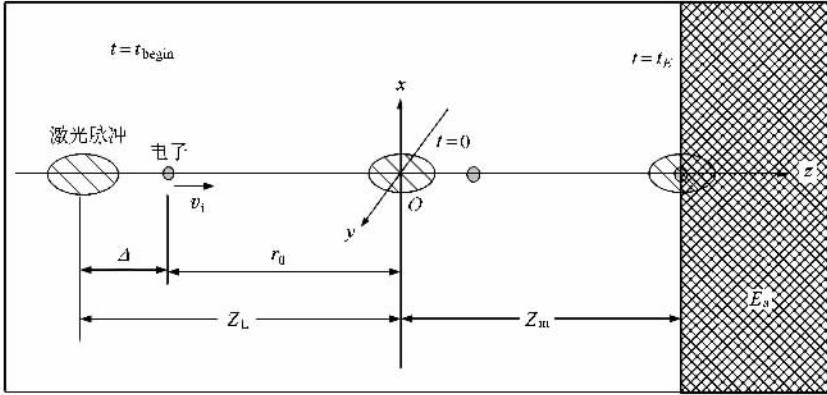


图 1 电子和激光脉冲作用过程示意图

本文采用的计算方法和文献 [23] 中采用的方法一样, 激光束是沿 x 轴极化的厄米-高斯 (0, 0) 模. 稳态场方程的五阶修正表达式如下^[34]:

$$E_x = E_0 \{ 1 + s^2(-\rho^2 Q^2 + i\rho^4 Q^3 - 2Q^2 \xi^2) + s^4[2\rho^4 Q^4 - 3i\rho^6 Q^5 - 0.5\rho^8 Q^6 + (8\rho^2 Q^4 - 2i\rho^4 Q^5) \xi^2] \} \psi_0 \exp(-i\zeta/s^2), \quad (3)$$

$$E_y = E_0 \{ s^2(-2Q^2) + s^4(8\rho^2 Q^4 - 2i\rho^4 Q^5) \} \times \xi \eta \psi_0 \exp(-i\zeta/s^2), \quad (4)$$

$$E_z = E_0 \{ s(-2Q) + s^3(6\rho^2 Q^3 - 2i\rho^4 Q^5) + s^5(-20\rho^4 Q^5 - 10i\rho^6 Q^6 + \rho^8 Q^7) \} \xi \psi_0 \times \exp(-i\zeta/s^2), \quad (5)$$

$$cB_x = E_0 \{ s^2(-2Q^2) + s^4(8\rho^2 Q^4 - 2i\rho^4 Q^5) \} \xi \eta \psi_0 \times \exp(-i\zeta/s^2), \quad (6)$$

$$cB_y = E_0 \{ 1 + s^2(-\rho^2 Q^2 + i\rho^4 Q^3 - 2Q^2 \eta^2) + s^4[2\rho^4 Q^4 - 3i\rho^6 Q^5 - 0.5\rho^8 Q^6 + (8\rho^2 Q^4 - 2i\rho^4 Q^5) \eta^2] \} \psi_0 \times \exp(-i\zeta/s^2), \quad (7)$$

$$cB_z = E_0 \{ s(-2Q) + s^3(6\rho^2 Q^3 - 2i\rho^4 Q^5) + s^5(-20\rho^4 Q^5 - 10i\rho^6 Q^6 + \rho^8 Q^7) \} \eta \psi_0 \times \exp(-i\zeta/s^2), \quad (8)$$

式中

$$\xi = \frac{x}{w_0}, \quad \eta = \frac{y}{w_0}, \quad (9)$$

$$\zeta = \frac{z}{kw_0^2}, \quad \rho^2 = \xi^2 + \eta^2; \quad Q = \frac{1}{i + 2\zeta}, \quad s = \frac{1}{kw_0}, \quad (10)$$

$$\psi_0 = iQ \exp(-i\rho^2 Q + i\omega t + \phi_0).$$

这里 E_0 是电场最大振幅 (下面采用无量纲参数 $a_0 \equiv \frac{eE_0}{m_e c}$ 来表示激光强度), w_0 是光束的束腰宽度, k 是波矢, ϕ_0 是初始相位, ω 是激光角频率. 对于有一定脉冲持续时间 τ 的激光脉冲, 其电磁场分量可以通过对稳态分量乘以一个时间形状因子得到, 这个时间形状因子一般假设为高斯型, 即

$$f(ct - z) = \exp\left(-\frac{(t - z/c)^2}{\tau^2}\right). \quad (11)$$

可以证明, 这样得到的光场电磁分量在时间修正的一阶近似下应满足 Maxwell 方程^[35].

3. 模拟结果及讨论

计算发现 ,电子的最终出射能量 γ_R 对初始相位 ϕ_0 非常敏感.电子空间位置的细微变化将导致电子感受光场的相位不同 ,下面选择那些加速效果好的电子感受的相位参数进行讨论.图 2 (a)是最大出射能量 γ_{Rm} (γ_{Rm} 是出射能量 γ_R 在初始相位 $\phi_0 \in [0, 2\pi]$ 上的最大值)随 Z_m 的变化曲线 ,其中 $E_a = 0.0008$ (当波长 $\lambda = 10 \mu\text{m}$ 时 ,这个强度大约相当于 256.8 MV/m).图 2 (b)给出了最大出射能量 γ_{Rm} 在 E_a 和 Z_m 张成的二维相空间的分布.这里采用的其他计算参数为 $a_0 = 10, \gamma_0 = 5, w_0 = 100, \tau = 30, \delta = 50$.

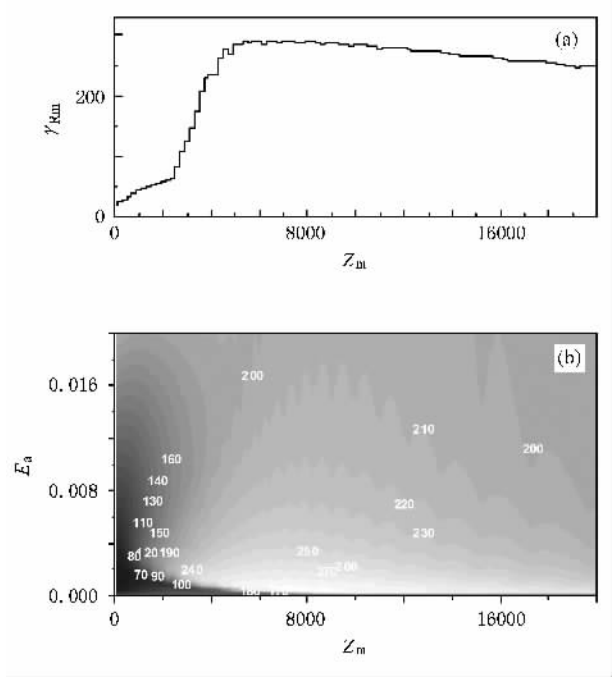


图 2 不同 E_a 和 Z_m 的电子最大出射能量 γ_{Rm} 分布 (a) γ_{Rm} 随 Z_m 的变化 (b) γ_{Rm} 的二维相空间分布

图 3 给出了出射电子能量随初始相位的变化 ,其中实线对应 $E_a = 0.0008$ 和 $Z_m = 6000$ 的情况 ,点划线对应没有外加电场的情况 ,点划线对应整个区域都加外电场 $E_a = 0.0008$ 的情况.由图 3 可见 ,和没有外加静电场相比 ,适当选择外加电场的区域和强度可以大大提高电子的出射能量.我们从图 3 可以看出 ,在上述条件下整个区域都加外电场并不有利于提高电子的出射能量 ,这是因为电子在进入强场

前已被外加电场偏转远离强场区而得不到加速.

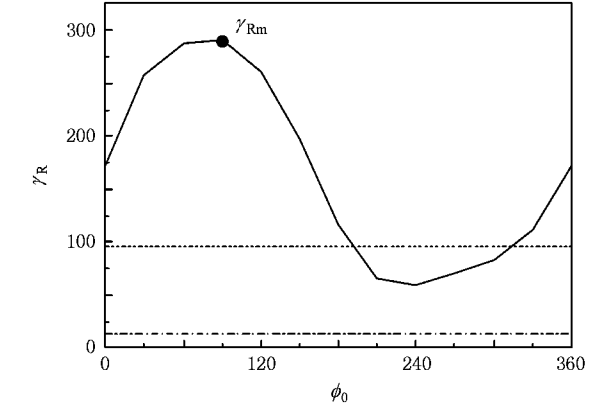


图 3 电子出射能量随初始相位 ϕ_0 的变化

图 4 (a) 给出了相互作用过程中电子的能量 γ 随 z 的变化曲线 ,图 4 (b) 给出了相互作用过程中电子离中心轴的距离在 xOz 平面上的投影 x 随 z 的变化曲线.图 4 中的实线对应 $E_a = 0.0008$ 和 $Z_m = 6000$ 的情况 ($\phi_0 = 90^\circ$) ,点线对应没有外加电场时的情况 ($\phi_0 = 90^\circ$).从图 4 可以发现 ,在适当选择外加电场时最大出射能量 ($\gamma_{Rm} \approx 289$) 几乎比没有外加电场时的最大出射能量 ($\gamma_{Rm} \approx 97$) 大两倍.电子轨迹在刚进入静电场时被电场力轻微弯曲 ,而电子能量在光场中的周期性振荡被彻底改变了 ,如图 4 (a) 中箭头所指.真空中外加磁场或电场的激光加速电子的物理机制已在文献 [30, 31] 中进行了详细讨论 ,简言之 ,外加场破坏了光场波动的对称性使得电子在光

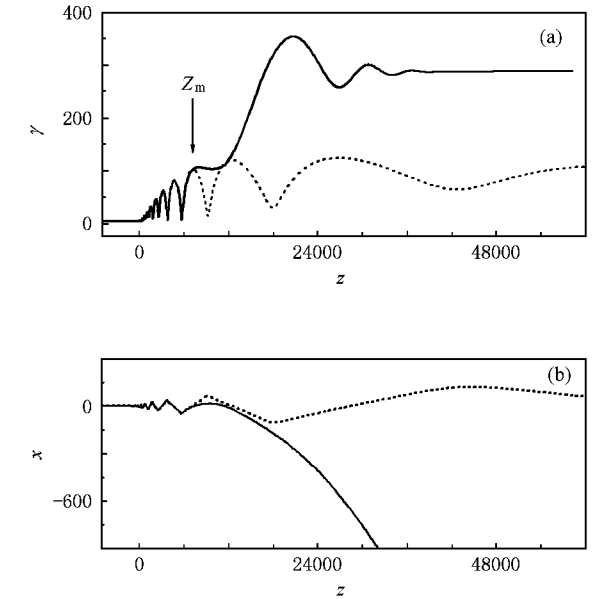


图 4 电子动力学特性 (a) γ 随 z 的变化 (b) x 随 z 的变化

场中加速和减速不对称而获得净能增益.

需要指出的是,文献 [30, 31] 中外加场是布满整个相互作用过程的,而本文模型中外加的电场只是分布于相互作用的尾部阶段.本文的结果也可以用文献 [30] 的类似机制进行解释.根据方程 (2) 可以得到电子的能量变化率

$$\frac{d\mathcal{P}}{dt} = -e[\beta_x(E_x + E_a) + \beta_z E_z], \quad (12)$$

式中 E_x 和 E_z 是光场贡献的电场,而 E_a 是外加静电场.因为整个加速过程中电子一直向前, $\beta_z > 0$, 所以纵向电场对能量的贡献随 E_z 振荡.然而, β_x 是振荡的,而且一般情况下 $E_x \gg E_a$, 横向电场对能量的贡献主要取决于 β_x 和 E_x 是否正好反向.如果电子在 E_x 的前一加速阶段完毕进入减速阶段时,外电场正好使电子的横向速度 β_x 反向,那么电子就会进入下一个加速阶段而不是减速.如果把光场近似看作平面波,由方程 (1) 可得

$$\frac{d(\gamma\beta_x)}{dt} = -e[(1 - \beta_z)E_x + E_a]. \quad (13)$$

对于高能电子 $\beta_z \approx 1$, 这时相对于 E_x 小得多的外场 E_a 可以对 β_x 的变化起主导作用.如图 4(a) 中箭头所指,电子从进入减速阶段的轨道被外场导入下一个加速阶段,对应的轨迹图可以看出,如果没有外

场,这时电子的运动方向一直向 $+x$ 方向,有了外场,轨迹就被弯曲甚至向着 $-x$ 方向.外加电场力相当于起着—个轨道开关的作用,虽然其强度和传统加速器中的场强相比已是非常强,但是相对采用的强激光光场的电场要弱得多,这样的外场只有在特殊点位才会对电子的动力学行为产生显著的影响.当外加电场延续到光场以外时,出射电子即使离开了光场还会不断地获得加速,主要是来自外电场的直接加速,这已不是本文所关心的问题.

4. 结 论

本文采用三维粒子模拟的方法,研究了一个在电子和激光脉冲作用尾部阶段外加静电场的聚焦激光脉冲真空加速电子方案.研究发现,外加静电场可以使电子不进入光场的减速相位,甚至直接进入下一个加速阶段,电子能获得比不加外场更高的净能增益.计算表明最大的出射能量 γ_{Rm} 将随激光场强 a_0 和束腰宽度 w_0 的增大而增加,电子出射能量还对入射角度和入射动量非常敏感.此外,为了获得更大的出射能量 γ_{Rm} ,对不同条件下的参数需要加以优化.

-
- [1] Aoyama M, Yamakawa K, Akahane Y, Ma J, Inoue N, Ueda H, Kiriya H 2003 *Opt. Lett.* **28** 1594
 - [2] Witte S, Zinkstok R T, Hogervorst W, Eikema K S E 2005 *Opt. Express* **13** 4903
 - [3] Bahk S W, Rousseau P, Planchon T A, Chvykov V, Kalintchenko G, Maksimchuk A, Mourou G A, Yanovsky V 2004 *Opt. Lett.* **29** 2837
 - [4] Tajima T, Mourou G 2002 *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **5** 031301
 - [5] Hora H 1988 *Nature* **333** 337
 - [6] Leemans W P, Nagler B, Gonsalves A J, Toth C, Nakamura K, Geddes C G R, Esarey E, Schroeder C B, Hooker S M 2006 *Nat. Phys.* **2** 696
 - [7] Mangles S P D, Murphy C D, Najmudin Z, Thomas A G R, Collier J L, Dangor A E, Dival E J, Foster P S, Gallacher J G, Hooker C J, Jaroszynski D A, Langley A J, Mori W B, Norreys P A, Tsung F S, Viskup R, Walton B R, Krushelnick K 2004 *Nature* **431** 535
 - [8] Geddes C G R, Toth C, van Tilborg J, Esarey E, Schroeder C B, Bruhwiler D, Nietner C, Cary J, Leemans W P 2004 *Nature* **431** 538
 - [9] Faure J, Glinec Y, Pukhov A, Kiselev S, Gordienko S, Lefebvre E, Rousseau J P, Burgi F, Malka V 2004 *Nature* **431** 541
 - [10] Salamin Y I, Keitel C H 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 1082
 - [11] Salamin Y I 2005 *Phys. Lett. A* **335** 289
 - [12] Salamin Y I 2006 *Phys. Rev. A* **73** 043402
 - [13] Varin C, Piché M 2002 *Appl. Phys. B* **74** 83
 - [14] Li D, Imasaki K 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 031110
 - [15] Singh K P 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 254102
 - [16] Stupakov G V, Zolotarev M S 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 5274
 - [17] Malka G, Lefebvre E, Miquel J L 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 3314
 - [18] Lefebvre E, Malka G, Miquel J L 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 1352
 - [19] Wang P X, Tang C X, Huang S J 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 2752
 - [20] Xie B S, Liu M P, Wang N Y 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 011118
 - [21] Chen M, Sheng Z M, Zhang J 2006 *Chin. Phys.* **15** 568
 - [22] Lu D Q, Qian L J, Li Y Z, Fan D Y 2007 *Chin. Phys.* **16** 88
 - [23] Wang P X, Ho Y K, Yuan X Q, Kong Q, Cao N, Sessler A M, Esarey E, Nishida Y 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 2253
 - [24] Salamin Y I, Keitel C H 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 095005
 - [25] Yu W, Bychenkov V, Sentoku Y, Yu M Y, Sheng Z M, Mima K 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 570
 - [26] Yu W, Chen Z Y, Yu M Y, Qian L J, Lu P X, Li R X, Koyama K 2002 *Phys. Rev. E* **66** 036406

- [27] Liu H , He X T , Chen S G 2004 *Phys. Rev. E* **69** 066409
- [28] Kong Q , Zhu L J , Wang J X , Ho Y K 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 650 (in Chinese) [孔 青、朱立俊、王加祥、霍裕昆 1999 物理学报 **48** 650]
- [29] Singh K P 2004 *Phys. Rev. E* **69** 056410
- [30] Kawata S , Maruyama T , Watanabe H , Takahashi I 1991 *Phys. Rev. Lett.* **66** 2072
- [31] Chen Z , Ho Y K , Kong Q , Wang P X , Wang W , Xu J J 2007 *J. Appl. Phys.* **102** 043110
- [32] McDonald K T 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 1350
- [33] Huang S H , Wu F M 2006 *Phys. Rev. E* **74** 068401
- [34] Barton J P , Alexander D R 1989 *J. Appl. Phys.* **66** 2800
- [35] Esarey E , Sprangle P , Pilloff M , Krall J 1995 *J. Opt. Soc. Am. B* **12** 1695

Electron acceleration by a focused laser pulse in static electric field

Huang Shi-Hua[†] Wu Feng-Min

(*Department of Physics , Zhejiang Normal University , Jinhua 321004 , China*)

(Received 16 October 2007 ; revised manuscript received 4 September 2008)

Abstract

The model given by Singh for vacuum laser acceleration in a static magnetic field is revisited by using the fifth order corrected laser field equations of a focused laser beam in which the diffraction effect and the longitudinal electric field of a focused laser beam are considered. However , the static magnetic field is replaced with a static electric field in our model. Simulation shows that the electrons can gain much more net energy in this model than that without the added field. Due to the added static electric field , the electrons can be drawn out of deceleration phase from one acceleration stage and directly enter to next acceleration stage.

Keywords : intense laser , laser acceleration

PACC : 4260K , 2921

[†] E-mail : hsh@zjnu.cn