

超强圆偏振激光直接加速产生超高能量电子束

尹传磊 王伟民 廖国前 李梦超 李玉同 张杰

Ultra-high-energy electron beam generated by ultra-intense circularly polarized laser pulses

Yin Chuan-Lei Wang Wei-Min Liao Guo-Qian Li Meng-Chao Li Yu-Tong Zhang Jie

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 144102 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.144102

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.144102>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I14>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

低密等离子体通道中的非共振激光直接加速

Non-resonant direct laser acceleration in underdense plasma channels

物理学报.2015, 64(14): 145201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.145201>

电子在激光驻波场中运动产生的太赫兹及 X 射线辐射研究

Motion-induced X-ray and terahertz radiation of electrons captured in laser standing wave

物理学报.2015, 64(12): 124104 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124104>

强激光与锥型结构靶相互作用准直电子束粒子模拟研究

Collimated electrons generated by intense laser pulse interaction with cone-structured targets using particle simulation

物理学报.2014, 63(9): 094101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.094101>

激光脉冲形状对弓形波电子俘获的影响

Effects of pulse temporal profile on electron bow-wave injection of electrons in laser-driven bubble acceleration

物理学报.2013, 62(20): 205203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.205203>

超短超强激光与薄膜靶相互作用中不同价态碳离子的来源

Origin of energetic carbon ions with different charge states in ultrashort laser-thin foil interactions

物理学报.2013, 62(16): 165201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.165201>

超强圆偏振激光直接加速产生超高能量电子束*

尹传磊 王伟民[†] 廖国前 李梦超 李玉同 张杰

(中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190)

(2014年12月5日收到; 2015年1月19日收到修改稿)

研究表明, 峰值强度为 10^{22} — 10^{25} W/cm² 量级的圆偏振激光脉冲的有质动力场可以直接加速并产生 GeV—TeV 的单能电子束, 其中被加速电子的能量与激光脉冲的峰值强度成线性定标关系. 为了获得更高能量的电子束, 通过对一维解析模型的分析得到: 如果电子束在激光传播的方向上具有一个初始能量 E_0 , 那么这种线性的定标关系可以被打破, 被加速电子束最终的能量可以被放大 E_0 倍. 这是由于具有一定初始能量的电子束不容易被激光脉冲抛在后面, 进而获得更高的加速距离. 二维粒子模拟结果显示: 当电子束的初始能量 E_0 为 MeV 量级时这个方法是有效的, 而当 E_0 过大时这个方法失效. 这是因为当电子的加速距离远大于激光脉冲的瑞利长度时, 激光强度的衰减使得电子束的加速错过了最佳加速场.

关键词: 电子加速, 超强激光, 粒子模拟

PACS: 41.75.Jv, 52.38.Kd

DOI: 10.7498/aps.64.144102

1 引言

激光尾波场加速器 (LWFA) 产生的加速梯度比传统的加速器高 3 个量级, 从而可以把电子的加速长度降低 3 个量级, 这使我们有可能在普通的实验平台上搭建小型加速器. 这种台面加速器在医学^[1,2]、生命科学和材料科学等^[3] 领域有着广泛的应用前景, 并推动了各种次级源的产生, 例如 X 射线辐射源^[4-8], 太赫兹辐射源等^[9-12]. 最近十年, 激光尾波场加速器取得了一系列重大进展^[13-25]. 实验演示了在 10 cm 量级的等离子体内加速产生的几个 GeV 的准单能电子束^[23-25]. 随着超短超强激光技术的迅速发展, 下一代的激光脉冲的强度将高达 10^{25} W/cm², 脉宽仅几个 fs, 例如欧洲的 ELI 激光装置. 这样的激光脉冲对激光尾波场加速来说是一个挑战. 首先, 太短的激光脉冲 (脉宽远小于等离子体波长) 无法有效地激发尾波场. 其次, 强度太高的激光脉冲会把电子完全排空, 激光的

自引导传输机理失效^[26], 同时会导致尾波场的饱和. 另一方面, 激光的有质动力正比于激光强度和反比于脉宽, 因此下一代超短超强激光脉冲能够非常有效地驱动激光有质动力场加速 (LPFA)^[27]. LPFA 比 LWFA 机理具有更高的加速梯度^[27]; 而且 LPFA 加速能够在真空中进行, 因此只要激光强度低于真空极化的阈值, 加速场就不会饱和^[28,29]. LWFA 机理是基于非线性激光等离子体相互作用的, 而 LPFA 可以在真空中实现, 对激光参数的依赖关系更简单. 需要指出的是, 在真空中运行的 LPFA 会受到激光散焦效应^[30-32] 的限制而影响其电子加速.

为了实现 LPFA, 文献^[27] 提出了如下方案: 把两个固体靶放置在激光传播方向上, 前面的靶很薄, 用作电子源, 另一个被用来反射激光并允许被充分加速后的电子束通过; 把两个靶的距离设置成电子加速距离时, 能得到最佳电子加速. 并用二维粒子模拟进行了演示. 2007 年, 文献^[33] 提出了类似的方案, 并在一维近似下进行了分析和演示. 这种

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2013CBA01501) 和国家自然科学基金 (批准号: 11105217, 11375261, 11375262) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: hbwwm1@iphy.ac.cn

激光直接加速的更早的想法在文献 [34,35] 已经提到. 我们的一维解析分析表明, 强度为 10^{22} — 10^{25} W/cm² 圆偏振激光可以在 mm—m 量级的加速距离产生 GeV—TeV 的单能电子束, 其中电子能量与激光强度成线性关系. 二维粒子模拟 (PIC) 演示了此方案, 表明激光强度为 10^{22} W/cm² 时, 能产生能量接近 1 GeV 的电子束. 文献 [36] 用二维 PIC 演示了 10^{23} — 10^{25} W/cm² 的激光产生了 7—130 GeV 的电子束, 其中激光在长距离传播中的发散效应和多维效应使得电子束的能量低于一维理论的预期. PIC 结果还表明, 采用这种方案时电子的辐射阻尼效应在 10^{25} W/cm² 才开始变得重要 [36]. 这里, 我们将采用低于这个强度的激光, 因此没有包括辐射阻尼效应.

为了进一步提高被加速电子束的能量并打破电子束能量和激光强度的线性定标关系, 本文提出了一个方案: 让电子束在激光传播的方向上具有一个初始速度, 增加电子的加速距离, 从而提高电子束最终的能量.

2 一维分析

考虑平面圆偏振激光脉冲作用下的单个电子的运动. 设脉宽为 τ_0 的激光脉冲沿 $+x$ 方向传播, 其矢势满足下面的形式:

$$A_y = a_0 \sin(\pi\xi/\tau_0) \sin(2\pi\xi) \quad 0 \leq \xi < \tau_0, \quad (1)$$

$$A_z = a_0 \sin(\pi\xi/\tau_0) \cos(2\pi\xi) \quad 0 \leq \xi < \tau_0, \quad (2)$$

其中 $\xi = t - x$, t 归一化到激光周期 T , x 归一化到激光波长 λ , a_0 归一化到 $m_e c^2/e$, c 是真空中光速, e 和 m_e 分别是电子的电荷和静止质量.

根据一维的哈密顿动力学方法 [27,34,36–38], 我们得到单个电子的动量 $p_x = (A_y^2 + A_z^2)/2$, $p_y = A_y$, $p_z = A_z$, 相对论因子 $\gamma = (A_y^2 + A_z^2)/2 + 1$ 以及有质动力场 $F_p = -\partial\gamma/\partial x$, 其中动量归一化到 $m_e c$. 由方程 (1) 和 (2) 我们可以很简单地得到相对论因子

$$\gamma = [a_0 \sin(\pi\xi/\tau_0)]^2/2 + 1 \quad (3)$$

和有质动力场

$$F_p = \pi a_0^2 \sin(2\pi\xi/\tau_0)/(2\tau_0). \quad (4)$$

根据 (3) 式, 当 $\xi \leq \tau_0/2$ 时, 电子处于加速阶段. 因此电子的加速距离可由文献 [27] 给出

$$l_{\text{acc}} = a_0^2 \tau_0/8. \quad (5)$$

在 $\xi = \tau_0/2$ 或 $x = l_{\text{acc}}$ 处, 电子获得最高能量

$$E_{\text{max}} = 0.255 a_0^2 \text{ MeV}. \quad (6)$$

如果激光脉冲的波长为 800 nm, 峰值光强为 I_0 , 那么方程 (4) 和 (5) 可改写为

$$l_{\text{acc}} = 0.23 [I_0/(10^{22} \text{ W/cm}^2)] (\tau_0/\lambda) \text{ mm} \quad (7)$$

和

$$E_{\text{max}} = 0.6 [I_0/(10^{22} \text{ W/cm}^2)] \text{ mm}. \quad (8)$$

如果电子具有初始动量 p_{x0} 和初始相对论因子 $\gamma_0 = (1 + p_{x0}^2)^{1/2}$, 我们得到单个电子的动量 $p_y = A_y$, $p_z = A_z$ 和

$$p_x = p_{x0} + (A_y^2 + A_z^2)(\gamma_0 + p_{x0})/2, \quad (9)$$

以及相对论因子

$$\gamma = \gamma_0 + (A_y^2 + A_z^2)(\gamma_0 + p_{x0})/2. \quad (10)$$

根据方程 (10), 我们得到了在不同初始能量下电子束能量随激光强度的变化曲线, 如图 1 所示. 可以看出, 在激光强度一定的情况下, 初始能量越高, 电子束的最高能量越高; 在初始能量一定的情况下, 激光强度越高, 电子束的最高能量越高.

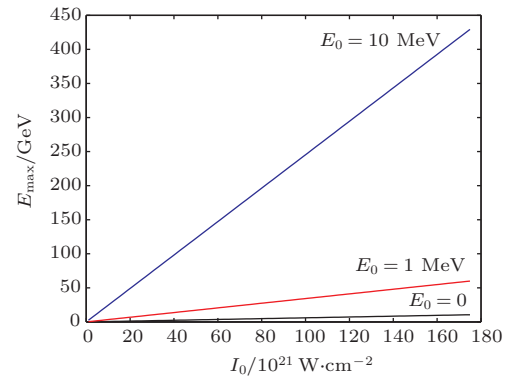


图 1 在不同的电子初始能量下被加速电子的最高能量随着激光脉冲峰值强度的变化

Fig. 1. The maximum energies of accelerated electrons as functions of the laser intensity with different initial electron energies E_0 .

特别地, 当 $p_{x0} \gg 1$, 即 $p_{x0} \rightarrow \gamma_0$ 时,

$$\gamma \simeq \gamma_0 (1 + A_y^2 + A_z^2). \quad (11)$$

因此, 与电子束初始能量为零时相比, 电子束的最高能量被放大近 γ_0 倍.

根据 (11) 式, 我们提出了一个 LPFA 加速的方案: 让电子束具有一个沿激光传播方向的初速度, 这样电子的最高能量能得到极大的提高 (大约 γ_0 倍), 这样的电子束可以通过 LWFA、或者低强度激

光驱动的LPFA、或者传统加速进行预先的加速得到. 同时可以发现, 为了得到这样一个能量增益, 电子的加速距离也会提高大约 γ_0 倍, 这可以很容易地推导出. 但是为了有效地加速电子, 加速距离不能比激光脉冲的瑞利长度大太多, 因此 γ_0 不能太大. 可以预料, 对于给定参数的激光脉冲, 有一个最优的 γ_0 与之对应. 下面我们用二维PIC演示此方案, 并给出相应的最优 γ_0 .

3 二维PIC

我们用KLAPS^[39]的二维版本进行模拟. 在模拟中, 具有初始能量 $E_0 = 0.511(\gamma_0 - 1)$ MeV的单能电子束沿着 $+x$ 方向运动. 电子束的厚度是 10λ (x 方向), 横向尺寸是 20λ (y 方向). 电子密度是 $0.001n_c$, 其中 n_c 是波长为 800 nm 的激光脉冲的临界密度. 模拟所采用的激光波长为 800 nm, 沿 $+x$ 方向传播, 其矢势采用如下形式:

$$A_y = a_0 \sin(\pi\xi/\tau_0) \sin(2\pi\xi) \exp(-y^2/r^2)$$

$$0 \leq \xi < \tau_0,$$

$$A_z = a_0 \sin(\pi\xi/\tau_0) \cos(2\pi\xi) \exp(-y^2/r^2)$$

$$0 \leq \xi < \tau_0.$$

激光脉冲宽度为2个激光周期, 焦斑半径为 20λ . 模拟中, 网格在 x 方向的尺寸为 $\lambda/40$, y 方向的尺寸

为 $\lambda/5$, 时间分辨为 $1/80$ 个激光周期. 每个网格中有9个电子. y 方向对电磁场和粒子均采用了吸收边界, 在 x 方向上采用了移动窗口技术.

图2给出了 40 ps 时刻的电子数目随能量和发散角的空间分布, 其中激光强度是 1.7×10^{22} W/cm². 图2显示存在一个最优的初始能量 $E_0 = 0.7$ MeV, 相应的 γ_0 约为 2.4 . 在 40 ps 时, 具有这个最优初始能量的电子束被加速到大约 3.6 GeV. 与之相应, 在文献[36]中, 二维PIC显示电子束初始能量为零, 得到的最高电子能量为 1 GeV. 因此, 具有 $E_0 = 0.7$ MeV 的初始能量时, 电子束最高能量被放大了 3.5 倍, 这与方程(9)的预测值 4.6 GeV 接近.

当激光强度降低到 1.7×10^{21} W/cm² 时, 最优初始能量增加到 3 MeV, 相应的 γ_0 大约是 6.9 , 如图3所示. 在这种情况下, 电子束的最大能量可达到 1 GeV, 即与初始静止的电子束相比[36], 能量提高了 10 倍, 方程(9)的预测值为 1.4 GeV.

在图4中, 激光强度提高到了 1.7×10^{23} W/cm². 最优初始能量降低到了 0.15 MeV, 相应的 γ_0 大约是 1.3 . 这时电子束的最大能量为 12 GeV, 与初始静止的电子束相比[36], 能量提高了 70% , 方程(9)的预测值为 21 GeV.

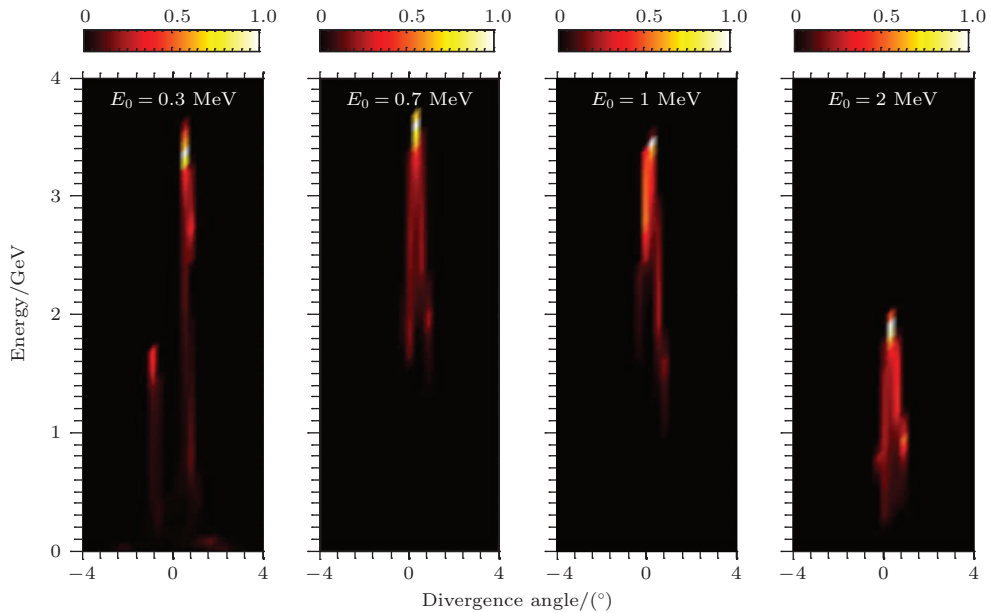


图2 (网刊彩色) 40 ps 时刻的电子数目随能量和发散角的空间分布. 图中的电子束具有不同的初始能量 E_0 , 激光强度是 1.7×10^{22} W/cm²

Fig. 2. (color online) Number distributions of electrons as functions of the energy and divergence angle at 40 ps, where the electron beam has a different initial energy E_0 in every plot. The laser intensity is 1.7×10^{22} W/cm².

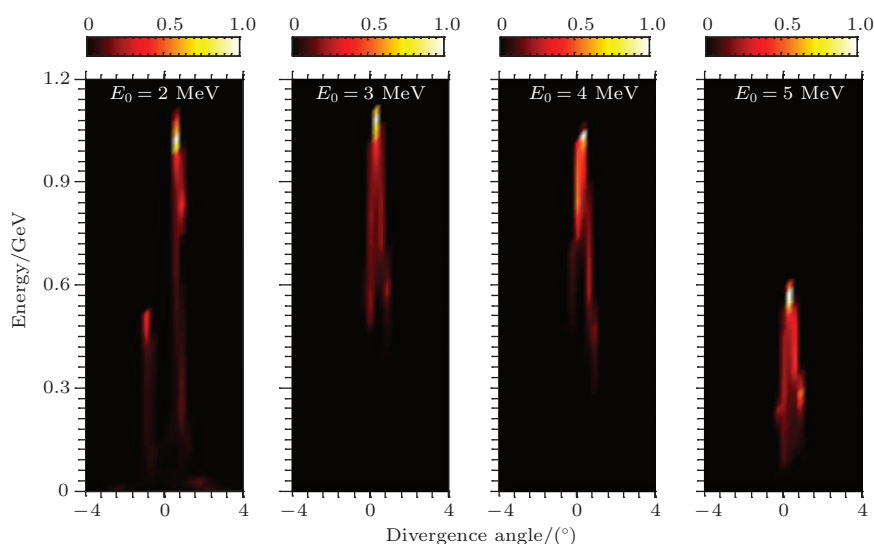


图3 (网刊彩色) 40 ps 时刻的电子数目随能量和发散角的空间分布. 图中的电子束具有不同的初始能量 E_0 , 激光强度是 $1.7 \times 10^{21} \text{ W/cm}^2$

Fig. 3. (color online) Number distributions of electrons as functions of the energy and divergence angle at 40 ps, where the electron beam has a different initial energy E_0 in every plot. The laser intensity is $1.7 \times 10^{21} \text{ W/cm}^2$.

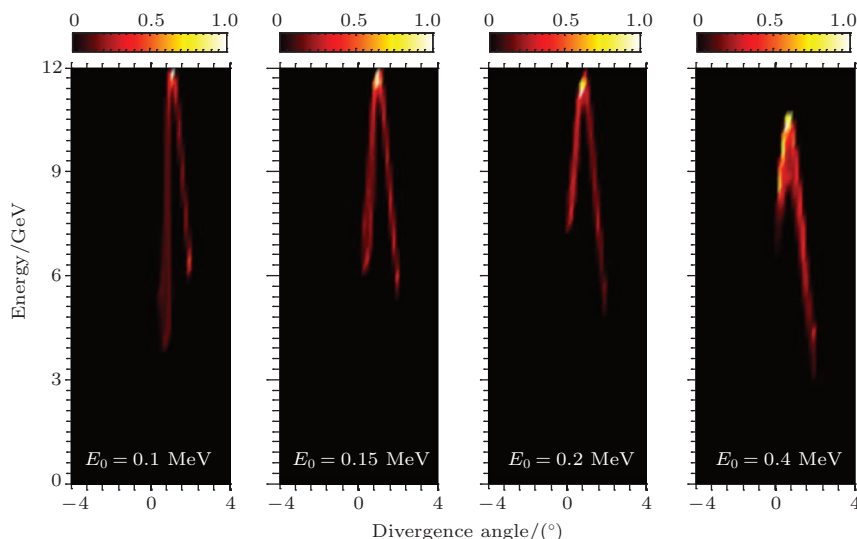


图4 (网刊彩色) 40 ps 时刻的电子数目随能量和发散角的空间分布. 图中的电子束具有不同的初始能量 E_0 , 激光强度为 $1.7 \times 10^{23} \text{ W/cm}^2$

Fig. 4. (color online) Number distributions of electrons as functions of the energy and divergence angle at 40 ps, where the electron beam has a different initial energy E_0 in every plot. The laser intensity is $1.7 \times 10^{23} \text{ W/cm}^2$.

以上结果表明此方案可以在电子初始能量为 MeV 量级时是有效的, 但是电子初始能量过高时这种方案失去作用, 因为电子加速距离远大于激光瑞利长度时, 激光强度的衰减使得电子错过了最佳加速场, 这个效应在文献 [27,36] 中进行了详细讨论. 因为加速距离正比于激光强度, 因此, 随着激光强度的增加电子束最优初始能量值逐渐下降.

另外, 当初始能量分别在 0.4—1 MeV (如图 2), 3—4 MeV (如图 3) 和 0.1—0.2 MeV (如图 4) 的范围内时, 可以发现电子束具有相似的能谱. 这

说明我们提出的这种方案具有较好的稳定性, 即当初始能量落在最优初始能量周围某个范围时, 能够产生单能电子束.

4 结 论

一维解析模型分析表明: 如果电子束具一个初始能量 E_0 , 可以打破被加速电子束的最终能量与激光强度的线性的定标关系, 即电子束最终的能量可以增加 E_0 倍, 同时电子束的加速距离得到很大

的提高.

二维PIC表明此方案只在 E_0 较低时有效. 对于一个给定的激光强度, 为了使电子束获得最大的能量增加, 需要有一个最优的初始能量与之对应. 随着激光强度的增加, 电子束的最优初始能量和最终能量的放大倍数都会降低. 当激光强度分别为 10^{21} , 10^{22} 和 10^{23} W/cm² 时, 电子束能量的放大倍数可以分别达到 10, 3.5 和 0.7.

参考文献

- [1] DesRosiers C, Moskvina V, Bielajew A F, Papiez L 2000 *Phys. Med. Biol.* **45** 1781
- [2] Glinec Y Y, Faure J, Malka V V, Fuchs T, Szymanowski H, Oelfke U 2006 *Med. Phys.* **33** 155
- [3] Glinec Y, Faure J, Le Dain L, Darbon S, Hosokai T, Santos J J, Lefebvre E, Rousseau J P, Burgy F, Mercier B, Malka V 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 025003
- [4] Kneip S, McGuffey C, Martins J L, Martins S F, Bellei C, Chvykov V, Dollar F, Fonseca R, Huntington C, Kalintchenko G, Maksimchuk A, Mangles S P D, Mat-suoka T, Nagel S R, Palmer C A J, Schreiber J, Phuoc K T, Thomas A G R, Yanovsky V, Silva L O, Krushelnick K, Najmudin Z 2010 *Nature Phys.* **6** 980
- [5] Cipiccia S, Islam M R, Ersfeld B, Shanks R P, Brunetti E, Vieux G, Yang X, Issac R C, Wiggins S M, Welsh G H, Anania M P, Maneuski D, Montgomery R, Smith G, Hoek M, Hamilton D J, Lemos N R C, Symes D, Rajeev P P, Shea V O, Dias J M, Jaroszynski D A 2011 *Nature Phys.* **7** 867
- [6] Phuoc K T, Corde S, Thauray C, Malka V, Tafzi A, Goddet J P, Shah R C, Sebban S, Rousse A 2012 *Nature Photon.* **6** 308
- [7] Chen L M, Yan W C, Li D Z, Hu Z D, Zhang L, Wang W M, Hafz N A M, Mao J Y, Huang K, Ma Y, Zhao J R, Ma J L, Li Y T, Lu X, Sheng Z M, Wei Z Y, Gao J, Zhang J 2013 *Sci. Report* **3** 1912
- [8] Tan F, Zhu B, Han D, Xin J T, Zhao Z Q, Cao L F, Gu Y Q, Zhang B H 2014 *Chin. Phys. B* **23** 034104
- [9] Leemans W P, Geddes C G R, Faure J, Toth C, van Tilborg J, Schroeder C B, Esarey E, Fubiani G, Auerbach D, Marcellis B, Carnahan M A, Kaindl R A, Byrd J, Martin M C 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 074802
- [10] Shen Y, Watanabe T, Arena D A, Kao C C, Murphy J B, Tsang T Y, Wang X J, Carr G L 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 043901
- [11] Wang W M, Kawata S, Sheng Z M, Li Y T, Chen L M, Qian L J, Zhang J 2011 *Opt. Lett.* **36** 2608
- [12] Wang W M, Gibbon P, Sheng Z M, Li Y T 2014 *Phys. Rev. A* **90** 023808
- [13] Pukhov A, Meyer-ter-vehn J 2002 *Appl. Phys. B* **74** 355
- [14] Mangles S P D, Murphy C D, Najmudin Z, Thomas A G R, Collier J L, Dangor A E, Divall 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
- [15] Geddes C, Toth C, van Tilborg J, Esarey E, Schroeder C, Bruhwiler D, Nieter C, Cary J, Leemans W 2004 *Nature* **431** 538
- [16] Faure J, Glinec Y, Pukhov A, Kiselev S, Gordienko S, Lefebvre E, Rousseau J, Burgy F, Malka V 2004 *Nature* **431** 541
- [17] Lu W, Huang C, Zhou M, Mori W B, Katsouleas T 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 165002
- [18] Lu W, Tzoufras M, Joshi C, Tsung F S, Mori W B, Vieira J, Fonseca R A, Silva L O 2007 *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **10** 061301
- [19] Faure J, Rechatin C, Norlin A, Lifschitz A, Glinec Y, Malka V 2006 *Nature* **444** 737
- [20] Wang W M, Sheng Z M, Zhang J 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 201502
- [21] Hafz N A M, Jeong T M, Choi I W, Lee S K, Pae K H, Kulagin V V, Sung J H, Yu T J, Hong K H, Hosokai T, Cary J R, Ko D K, Lee J 2008 *Nature Photon.* **2** 571
- [22] Liu J S, Xia C Q, Wang W T, Lu H Y, Wang C, Deng A H, Li W T, Zhang H, Liang X Y, Leng Y X, Lu X M, Wang C, Wang J Z, Nakajima K, Li R X, Xu Z Z 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 035001
- [23] 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 *Nature Phys.* **2** 696
- [24] Leemans W P, Gonsalves A J, Mao H S, Nakamura K, Benedetti C, Schroeder C B, Toth C, Daniels J, Mittelberger D E, Bulanov S S, Vay J L, Geddes C G R, Esarey E 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 245002
- [25] Wang X, Zgadzaj R, Fazel N, Li Z, Yi S A, Zhang X, Henderson W, Chang Y Y, Korzekwa R, Tsai H E, Pai C H, Quevedo H, Dyer G, Gaul E, Martinez M, Bernstein A C, Borger T, Spinks M, Donovan M, Khudik V, Shvets G, Ditmire T, Downer M C 2013 *Nature Commun.* **4** 1988
- [26] Wang W M, Sheng Z M, Zeng M, Liu Y, Hu Z D, Kawata S, Zheng C Y, Mori W B, Chen L M, Li Y T, Zhang J 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 184104
- [27] Wang W M, Sheng Z M, Li Y T, Chen L M, Kawata S, Zhang J 2010 *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **13** 071301
- [28] Heisenberg W, Euler H 1936 *Z. Phys.* **98** 714
- [29] Dittrich W, Gies H 2000 *Probing the Quantum Vacuum* (Berlin: Springer-Verlag)
- [30] Sun G Z, Ott E, Lee Y C, Guzdar P 1987 *Phys. Fluids* **30** 526
- [31] Borisov A B, Borovskiy A V, Shiryayev O B, Korobkin V V, Prokhorov A M, Solem J C, Luk T S, Boyer K, Rhodes C K 1992 *Phys. Rev. A* **45** 5830
- [32] Wang W M, Zheng C Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 310 (in Chinese) [王伟民, 郑春阳 2006 物理学报 **55** 310]
- [33] Wang F C, Shen B F, Zhang X M, Li X M, Jin Z Y 2007 *Phys. Plasmas* **14** 083102
- [34] Yu W, Bychenkov V, Sentoku Y, Yu M Y, Sheng Z M, Mima K 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 570

- [35] Kulagin V V, Cherepenin V A, Suk H 2004 *Phys. Plasmas* **11** 5239
- [36] Wang W M, Sheng Z M, Kawata S, Zheng C Y, Li Y T, Chen L M, Dong Q L, Lu X, Ma J L, Zhang J 2012 *J. Plasma Phys.* **78** 461
- [37] Meyer-ter-Vehn J, Pukhov A, Sheng Z M 2001 in: *Atoms, Solids, and Plasmas in Super-Intense Laser Fields* Edited by Batani D *et al.* (Norwell MA: Kluwer Academic/Plenum Publishers) pp167–192
- [38] Sheng Z M, Mima K, Sentoku Y, Jovanovic M S, Taguchi T, Zhang J, Meyer-ter-Vehn J 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 055004
- [39] Wang W M, Gibbon P, Sheng Z M, Li Y T 2015 *Phys. Rev. E* **91** 013101

Ultrahigh-energy electron beam generated by ultra-intense circularly polarized laser pulses*

Yin Chuan-Lei Wang Wei-Min[†] Liao Guo-Qian Li Meng-Chao Li Yu-Tong Zhang Jie

(Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, CAS, Beijing 100190, China)

(Received 5 December 2014; revised manuscript received 19 January 2015)

Abstract

The earlier research showed that circularly polarized laser pulses with peak intensities in a range of 10^{22} – 10^{25} W/cm² can directly accelerate and generate GeV–TeV monoenergetic electron beams with a linear energy scaling with the laser intensity. To obtain higher energy electron beams, a scheme is proposed to use an electron beam with an initial energy E_0 along the laser propagation direction. This scheme can overcome the linear energy scaling with $E_0 = 0$ obtained previously and enhance the beam energy by E_0 folds. This is because an electron beam with an initial energy can move with the laser pulse together and therefore obtain a longer acceleration distance. Two-dimensional particle-in-cell simulation shows that this scheme is effective only for the electron beams initially with low energy on the order of MeV. With overhigh energy, electrons will miss the optimum acceleration field because the electron acceleration distance is much longer than the Rayleigh distance and the laser intensity is significantly attenuated.

Keywords: electron acceleration, ultra-intense laser, particle-in-cell simulation

PACS: 41.75.Jv, 52.38.Kd

DOI: 10.7498/aps.64.144102

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2013CBA01501) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11105217, 11375261, 11375262).

† Corresponding author. E-mail: hbwwm1@iphy.ac.cn