

强激光与锥型结构靶相互作用准直电子束粒子模拟研究*

吴凤娟¹⁾²⁾ 周维民¹⁾ 单连强¹⁾ 李芳¹⁾ 刘东晓¹⁾ 张智猛¹⁾ 李博原¹⁾
毕碧¹⁾ 伍波¹⁾ 王为武¹⁾ 张锋¹⁾ 谷渝秋^{1)†} 张保汉¹⁾

1) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心等离子体物理重点实验室, 绵阳 621900)

2) (西南科技大学极端条件物质特性联合实验室, 绵阳 621010)

(2013年11月16日收到; 2013年12月19日收到修改稿)

利用PIC(particle-in-cell)方法模拟研究了超短强激光与锥型三明治结构靶相互作用快电子束的产生和传输, 并与锥通道靶、锥丝靶和锥靶在相同激光参数下的作用结果进行了比较. 研究发现强激光与锥三明治靶作用产生的快电子能被不同密度材料产生的准静态界面强磁场有效地准直传输. 相对其他三种锥型结构靶, 锥三明治靶能产生更多数目及更高能量的快电子, 提高了激光到快电子的能量转换效率和快电子束的品质, 这对快点火能量沉积是有利的.

关键词: 锥三明治靶, PIC模拟, 快电子准直, 准静态磁场

PACS: 41.75.Jv, 52.38.Kd, 52.59.-f

DOI: 10.7498/aps.63.094101

1 引言

在惯性约束聚变(inertial confinement fusion, ICF)研究中, 快点火(fast ignition, FI)方案与传统的中心点火方案相比, 放宽了对驱动对称性和点火总能量的要求, 是国际上ICF研究的热点^[1-3]. 电子束FI是指利用一束超短强脉冲激光照射到预埋靶丸中的导引锥顶部, 产生一束相对论电子束, 这些快电子向预压缩燃料中传输, 并将能量沉积给压缩燃料, 来实现聚变点火^[1-3]. 2002年, Kodama等实验证实强激光与锥靶作用产生的高能快电子使内爆中子产额提高近三个量级, 引起了国际上广泛的研究和关注^[4]. 激光与锥靶作用产生的快电子需要传输几十个微米才能到达高密度压缩燃料^[5], 传输过程中可能出现的双流不稳定性, 成丝不稳定性和Weibel不稳定性等都会影响快电子束的能谱和发散等品质^[6], 这将严重制约FI中快电子能量到压缩燃料的能量耦合效率.

为了增加激光到压缩燃料的能量耦合, 提高快电子的产额和品质, 人们开展了大量关于引导和准直快电子的实验和理论模拟工作^[7-12]. 2004年, Kodama等提出一根细丝连接在金锥靶基部的锥丝靶设计, 研究发现强激光与锥靶产生的高能电子沿着锥壁传输通过锥顶末端之后, 可被等离子体丝周围形成的准静态电场和磁场约束传输几个毫米的距离^[8]. 2011年, Yang等模拟强激光与锥通道靶相互作用发现激光与锥壁上产生的快电子束被通道产生的界面磁场很好约束, 而且比锥丝靶准直引导快电子的效果更好^[9]. 除了对锥靶结构进行优化, 人们还利用不同电阻率材料界面产生的自生磁场对快电子进行准直和约束. 2007年, Robinson等设计了中间区域为高电阻率材料而环向周围为低电阻率材料的靶型来产生界面磁场准直电子^[10], 并得到了实验的证实^[13]. Zhou^[14]、Cai^[15]和Wu^[16]等研究给出激光与低密度芯外覆盖高密度包壳材料的靶型作用产生的强界面磁场对快电子束有效准直传输.

* 国家自然科学基金(批准号: 11174259, 11175165, 11305157)和西南科技大学博士基金(批准号: 10ZX7127)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: yqgu@ceap.ac.cn

针对快点火锥壳靶设计, 本文提出在锥顶处连接中间低密度芯外层包覆高密度材料的锥三明治靶设计方案, 并利用二维PIC程序FLIPS2D^[17-19]模拟强激光与锥三明治靶相互作用中快电子束的产生和沿着锥壁传输过锥顶的过程, 以及穿过锥顶的快电子继续沿着连接的不同密度的三明治靶准直传输的特性. 最后将强激光与锥三明治靶作用产生的快电子能量分布和空间分布与锥通道靶、锥丝靶和锥靶的结果进行比较. 结果表明相比其他三种锥型结构靶, 锥三明治靶可以更有效产生和传输快电子.

2 PIC模拟条件

模拟区域如图1所示, 大小是 $x \times y = 60\lambda \times 40\lambda$, 计算网格大小取为 $\Delta x = \Delta y = 0.025\lambda$, 计算时间步长为 0.0125τ , 其中 $\lambda = 1.0 \mu\text{m}$ 和 τ 分别是激光波长和激光周期. 一束强度为 $3.5 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$ ($a_0 = 5.0$)的p偏振激光脉冲从模拟区域的左端进入并沿着 x 轴传播, 横向空间分布采用高斯分布且焦斑大小(半高全宽)取为 7λ . 在 x 方向的脉冲结构采用上升沿(5τ)+平台(20τ)+下降沿(5τ)的形状. 场和粒子的纵向和横向边界均采用吸收边界条件. 锥张角为 30° , 锥壁分布在 1λ 和 36λ 之间, 锥的内直径为 3λ , 锥壁宽度为 3λ , 锥顶宽度为 3λ . 锥靶的等离子体初始密度为 $n_e = 20n_c$. 锥顶处连接三明治靶的中间层等离子体密度为 $n_e = 2n_c$ (长度为 10λ , 宽度为 3λ), 外层包覆材料的等离子体密度与锥靶一样为 $n_e = 20n_c$ (长度为 10λ , 宽度为 3λ). 初始等离子体中电子和离子的温度为 1 keV .

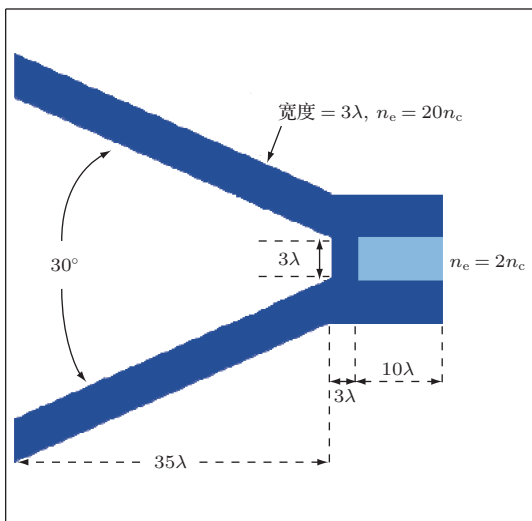


图1 锥三明治靶结构示意图

3 模拟结果和讨论

3.1 强激光与锥三明治靶作用快电子产生

当p偏振的强激光脉冲沿着 x 轴入射到锥三明治靶上, 锥靶对激光场的非线性聚焦作用, 导致激光强度有所增加^[20]. 图2给出了激光场能量密度 W 在时刻 $t = 40\tau$ (a)和 50τ (b)平面(x, y)内的分布. 能量密度由公式 $W = (\epsilon_0 E^2 + B^2/\mu_0)/2$ 计算, 其中, ϵ_0 是真空介电常数, μ_0 是真空磁导率, E 是电场, B 是磁场. 从图2(a)和(b)可以看到随着激光场逐渐进入到锥内, 激光场能密度在锥尖汇聚, 激光场强度有所增强.

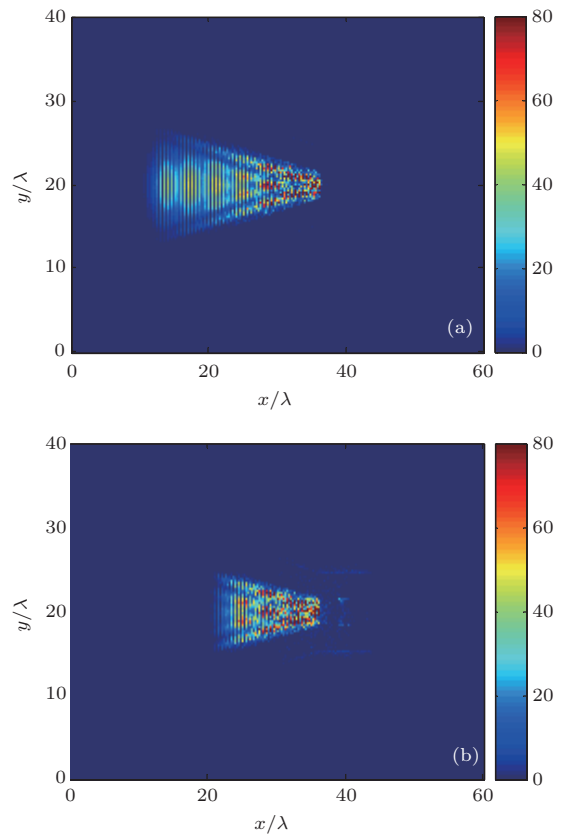


图2 (网刊彩色) 锥三明治靶场能密度 W 分布 (a) $t = 40\tau$; (b) $t = 50\tau$

激光与等离子体相互作用会通过多种机理将激光能量转移给电子. 由于激光场仅能与有效临界密度(相对论质量修正 $n_{\text{ceff}} = \gamma n_c \approx 4n_c$)区域内的等离子体相互作用, 锥靶等离子体初始密度设为 $n_e = 20n_c$, 导致一部分激光被反射, 但大部分激光会被等离子体所吸收. 激光能量转移给靶电子, 从而将电子加速到相对论能量. 图3给出了锥三明治靶中电子密度在时刻 $t = 40\tau$ (a)和 50τ (b)平面

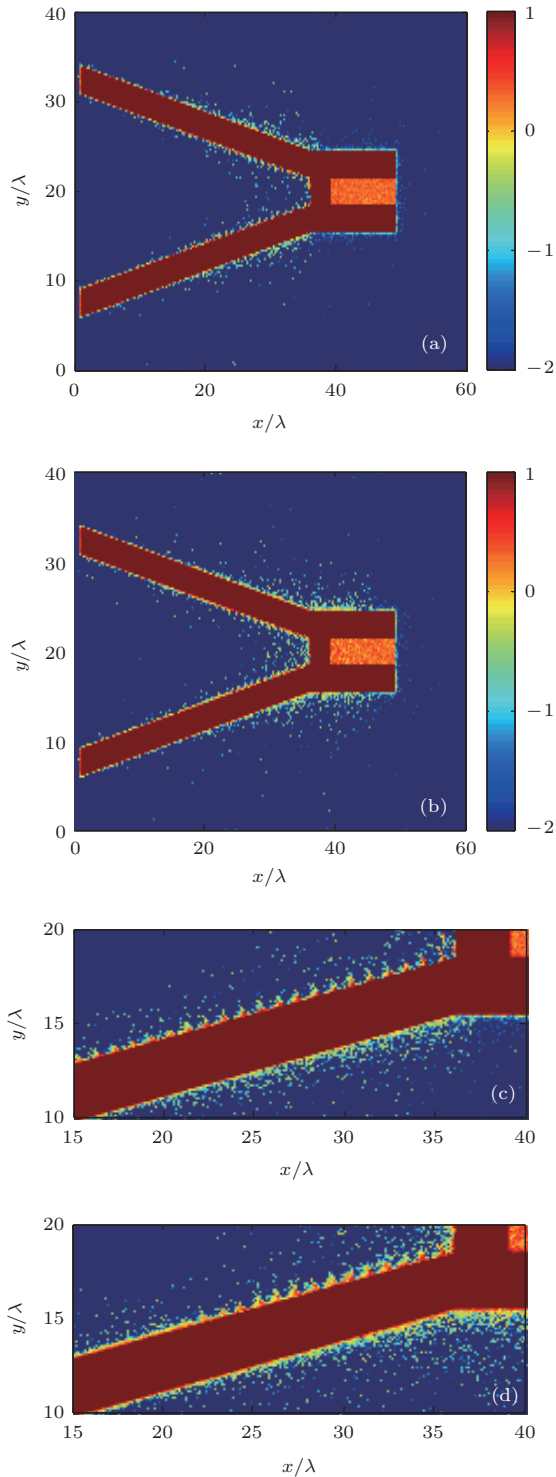


图3 (网刊彩色) 锥三明治靶电子密度对数分布 (a) $t = 40\tau$; (b) $t = 50\tau$; (c) 和 (d) 分别是 (a) 和 (b) 的截图

(x, y) 内对数分布图. 为了清楚看到电子密度的分布, 图3(c)和(d)分别给出了图3(a)和(b)的部分截图. 从图3(c)和(d)可以看到强激光场将锥壁表面的电子拉到真空, 电子束在锥内壁的空间尺度为 1λ , 这是典型的真空加热机理^[21]. 从锥壁上拉出

电子的数目 $N_e = (a_0 n_c \lambda / \pi) \sin \theta$, θ 是锥面与激光入射方向的夹角, λ 是激光波长, a_0 是激光强度^[22]. 随着激光在锥内传输, 激光聚焦强度逐渐增加, 导致拉出的电子数目有所增加. 但是只有在激光电场足够强时才能将电子拉出锥的内壁表面, 也就是说, 通常只有在激光电场峰值附近处的电子才能被激光场加速并脱离靶表面.

3.2 快电子沿锥三明治靶传输

超强激光从锥内壁拉出的电子束沿着锥壁加速并向锥顶传输过程中, 会在锥的内壁产生很强的准静态磁场. 图4给出由激光场归一化的准静态磁场 B_z 在时刻 $t = 40\tau$ (a), 50τ (b), 60τ (c) 和 70τ (d) 平面 (x, y) 内分布, 且磁场是在一个激光周期内平均得到的结果, 单位为 $m_e c \omega_0 / e$. 从图4时刻 $t = 40\tau$ 和 50τ 看到, 沿着锥内壁产生百兆高斯的准静态磁场. 在锥靶内, 被激光场拉出的电子受洛伦兹力 $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ 作用沿着锥内壁表面向锥顶运动^[21], 运动的快电子电流在锥内壁产生很强的准静态磁场, 被引导到锥顶的电子束会受激光场的有质动力进一步加速^[23]. 图4时刻 $t = 60\tau$ 和 70τ 可以看到传输过锥顶的快电子束继续沿着三明治靶传输, 且快电子电流在三明治结构靶不同密度的界面处产生很强的准静态磁场, 这些磁场反过来约束电子向前准直传输.

作为比较, 图5给出了锥三明治靶(黑线)、锥通道靶(红线)、锥丝靶(蓝线)和锥靶(绿线)前向(纵向速度 $v_x > 0$) 电子能量分布. 选择初始时刻位于锥靶(位置 $x_{\text{ini}} < 39\lambda$) 内, 在时刻 $t = 100\tau$ 传输过锥顶(位置 $x_{\text{end}} > 39\lambda$) 的电子用于分析. 这四种锥型结构靶中, 前面的锥靶部分与图1中的锥三明治靶的结构是一样的. 锥通道靶是文献[9]中构型, 即在锥顶上连接一个微通道. 微通道的等离子体密度与锥靶一样为 $n_e = 20n_c$, 两侧通道的长度为 10λ , 宽度为 3λ , 通道中间真空部分的宽度为 3λ . 锥丝靶结构是文献[8]中构型, 即在锥顶中间连接一根碳丝, 碳丝的等离子体密度取为 $n_e = 2n_c$, 长度为 10λ , 宽度为 3λ . 从图5可以看出, 锥三明治靶中传输过锥顶的前向电子数目和能量明显高于其他三种锥型结构靶. 说明强激光与锥三明治靶作用产生的快电子可以被锥顶连接的三明治结构强的界面磁场更有效地引导传输, 进而提高了激光到快电子的能量转换效率.

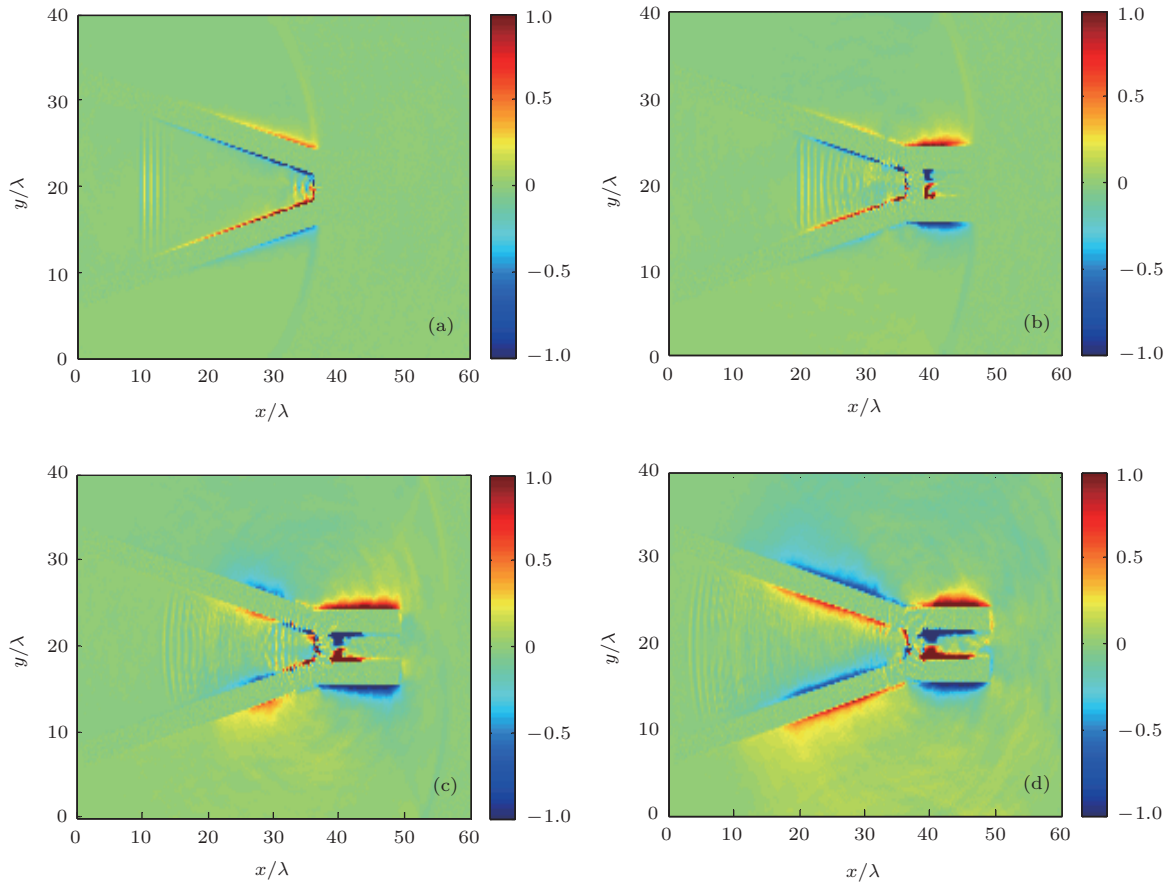


图4 (网刊彩色) 锥三明治靶激光磁场归一化的准静态磁场 B_z 分布(磁场是对一个激光周期内取平均) (a)—(d) 分别为时刻 $t=40\tau, 50\tau, 60\tau, 70\tau$

为了更细致反映不同锥型结构靶对快电子的准直传输作用, 图6(a)和(b)分别给出了图5中的快电子(能量 > 0.5 MeV)纵向和横向的空间分布. 从图6(a)的纵向分布可以看到, 锥靶中快电子分布只能沿着纵向传输很短的距离, 这主要是因为从锥靶中产生的快电子离开锥顶后, 与锥顶之间形成了很强的电荷分离鞘电场, 这些鞘电场限制了快电子进一步的传输. 而锥三明治靶、锥通道靶、锥丝靶与锥靶相比, 可以沿着纵向有效引导快电子传输. 但是, 锥三明治靶比锥通道靶和锥丝靶引导的快电子数目更多, 差别主要是锥顶连接的三明治靶中快电子电流在不同密度界面产生的准静态强磁场的约束作用. 此外, 从图6(b)横向分布可以看到, 锥通道靶传输的电子数目在横向上呈现两个峰值分布, 在三维情况下应为环状的分布, 这是因为在通道的中间真空区域, 离开锥顶的快电子与锥顶之间形成了鞘电场, 限制快电子向真空区域输运; 而朝前运动的快电子电流在通道壁形成的界面磁场引导电子沿着通道壁传输^[9]. 锥丝靶中快电子可以被

碳丝周围的强静磁场有效准直传输, 形成一个横向分布很窄的峰. 相比其他三种锥结构靶, 锥三明治靶除了能准直传输更多数目的快电子, 且在横向上分布更均匀, 从而有效提高了激光到快电子的能量耦合效率和快电子束的品质.

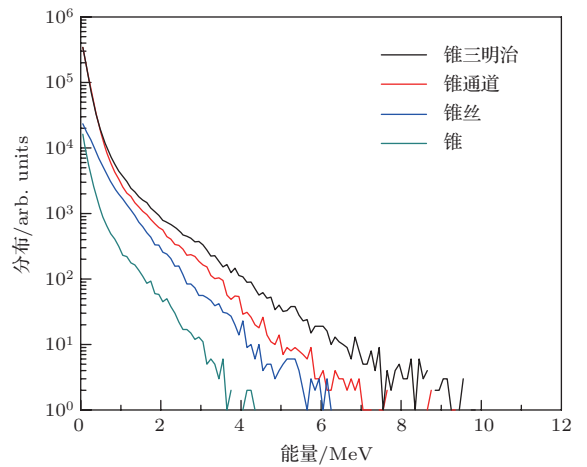


图5 (网刊彩色) 四种锥结构靶在时刻 $t=100\tau$ 前向电子的能谱分布

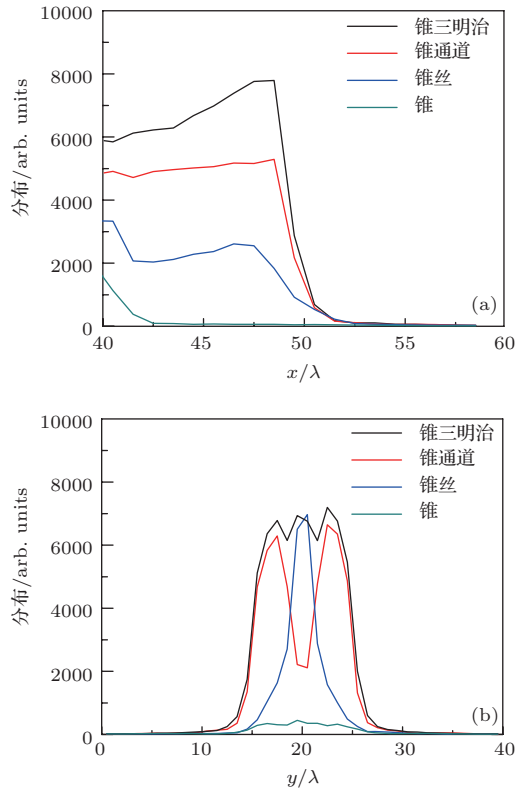


图6 (网刊彩色) 四种锥结构靶在时刻 $t = 100\tau$ 前向快电子分布 (a) 纵向; (b) 横向

4 结 论

本文利用二维PIC程序FLIPS2D模拟强激光与锥型结构靶相互作用中快电子的产生和传输。结果表明强激光在锥内聚焦产生高能量的快电子, 这些快电子受锥内壁的快电子电流产生的准静态磁场作用约束传输到锥尖, 随后被锥顶连接的三明治靶界面静态磁场有效准直。相比锥通道靶、锥丝靶和锥靶, 强激光与锥三明治靶作用准直传输快电子的数目更多以及能量更高, 有效提高了激光到快电子的能量转换效率和快电子束的品质。

参考文献

[1] Zhang J T, He B, He X T, Chang T Q, Xu L B, Andereev N E 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 921 (in Chinese) [张家泰, 何斌, 贺贤士, 常铁强, 许林宝, 安德列夫 N E 2001 物理学报 **50** 921]
 [2] Tabak M, Hammer J, Glinsky M E, Kruer W L, Wilks S C, Woodworth J, Campbell E M, Perry M D, Mason R J 1994 *Phys. Plasma* **1** 1626
 [3] Hinkel D E 2013 *Nucl. Fusion* **53** 104027
 [4] Kodama R, Shiraga H, Shigemori K, Toyama Y, Fujioka S, Azechi H, Fujita H, Habara H, Hall T, Izawa Y, Jitsuno T, Kitagawa Y, Krushelnick K M, Lancaster K L,

Mima K, Nagai K, Nakai M, Nishimura H, Norimatsu T, Norreys P A, Sakabe S, Tanaka K A, Youssef A, Zepf M, Yamanaka T 2002 *Nature* **418** 933
 [5] Kodama R, Norreys P A, Mima K, Dangor A E, Evans R G, Fujita H, Kitagawa Y, Krushelnick K, Miyakoshi T, Miyanaga N, Norimatsu T, Rose S J, Shozaki T, Shigemori K, Sunahara A, Tampo M, Tanaka K A, Toyama Y, Yamanaka T, Zepf M 2001 *Nature* **412** 798
 [6] Cottrill L A, Langdon A B, Lasinski B F, Lund S M, Molvig K, Tabak M, Town R P J, Williams E A 2008 *Phys. Plasma* **15** 082108
 [7] Mu J, Sheng Z M, Zheng J, Zhang J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 135202 (in Chinese) [穆洁, 盛政明, 郑君, 张杰 2013 物理学报 **62** 135202]
 [8] Kodama R, Sentoku Y, Chen Z L, Kumar G R, Hatchett S P, Toyama Y, Cowan T E, Freeman R R, Fuchs J, Izawa Y, Key M H, Kitagawa Y, Kondo K, Matsuoka T, Nakamura H, Nakatsutsumi M, Norreys P A, Norimatsu T, Snavely R A, Stephens R B, Tampo M, Tanaka K A, Yabuuchi T 2004 *Nature* **432** 1005
 [9] Yang X H, Xu H, Ma Y Y, Shao F Q, Yin Y, Zhuo H B, Yu M Y, Tian C L 2011 *Phys. Plasma* **18** 023109
 [10] Robinson A P L, Sherlock M 2007 *Phys. Plasma* **14** 083105
 [11] Wang H, Cao L H, Zhao Z Q, Yu M Y, Gu Y Q, He X T 2012 *Laser and Particle beams* **30** 553
 [12] Yu J Q, Jin X L, Zhou W M, Li B, Gu Y Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **225202** (in Chinese) [余金清, 金晓林, 周维民, 李斌, 谷渝秋 2012 物理学报 **61** 225202]
 [13] Kar S, Robinson A P L, Carroll D C, Lundh O, Markey K, McKenna P, Norreys P, Zepf M 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 055001
 [14] Zhou C T, Wang X G, Wu S Z, Cai H B, Wang F, He X T 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 201502
 [15] Cai H B, Zhu S P, Chen M, Wu S Z, He X T, Mima K 2011 *Phys. Rev. E* **83** 036408
 [16] Wu S Z, Zhou C T, Zhu S P 2010 *Phys. Plasma* **17** 063103
 [17] Zhou W M, Gu Y Q, Hong W, Cao L F, Zhao Z Q, Ding Y K, Zhang B H, Cai H B, Mima K 2010 *Laser and Particle beams* **28** 585
 [18] Wu F J, Zhou W M, Shan L Q, Zhao Z Q, Yu J Q, Zhang B, Yan Y H, Zhang Z M, Gu Y Q 2013 *Laser and Particle Beams* **31** 123
 [19] Yu J Q, Zhou W M, Jin X L, Li B, Zhao Z Q, Cao L F, Dong K G, Liu D X, Fan W, Wei L, Yan Y H, Qian F, Yang Z H, Hong W, Gu Y Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 175202 (in Chinese) [余金清, 周维民, 金晓林, 李斌, 赵宗清, 曹磊峰, 董克攻, 刘东晓, 范伟, 魏来, 闫永宏, 钱凤, 杨祖华, 洪伟, 谷渝秋 2012 物理学报 **61** 175202]
 [20] Sentoku Y, Mima K, Ruhl H, Toyama Y, Kodama R, Cowan T E 2004 *Phys. Plasma* **11** 3083
 [21] Brunel F 1987 *Phys. Rev. Lett.* **59** 52
 [22] Sentoku Y, Downer M C 2010 *High Energy Density Physics* **6** 268
 [23] Nakamura T, Mima K, Sakagami H, Johzaki T 2007 *Phys. Plasma* **14** 053112

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

Wu Feng-Juan¹⁾²⁾ Zhou Wei-Min¹⁾ Shan Lian-Qiang¹⁾ Li Fang¹⁾ Liu Dong-Xiao¹⁾
Zhang Zhi-Meng¹⁾ Li Bo-Yuan¹⁾ Bi Bi¹⁾ Wu Bo¹⁾ Wang Wei-Wu¹⁾ Zhang Feng¹⁾
Gu Yu-Qiu^{1)†} Zhang Bao-Han¹⁾

1) (*Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

2) (*Joint Laboratory for Extreme Conditions Matter Properties, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China*)

(Received 16 November 2013; revised manuscript received 19 December 2013)

Abstract

Generation and propagation of fast electron bunches from interaction of short, ultra intense laser with cone-sandwich target are investigated by PIC (particle-in-cell) simulation. Results are compared with those in the interaction of the same laser parameters with cone-channel target, cone-wire target and cone target. Fast electrons generated by the interaction of intense laser with cone-sandwich target can be effectively collimated and propagated by the quasi-static strong magnetic field generated by the material surface of different densities. Compared with the other three cone-structured target, the more number and the higher energy of the fast electrons are generated by cone-sandwich target. This can well improve the energy conversion efficiency of the laser to fast electrons and the quality of fast electron bunches, which are favorable for the fast ignition energy deposition.

Keywords: cone sandwich target, PIC simulation, fast electron collimation, quasi-static magnetic field

PACS: 41.75.Jv, 52.38.Kd, 52.59.-f

DOI: [10.7498/aps.63.094101](https://doi.org/10.7498/aps.63.094101)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11174259, 11175165, 11305157), and the Research Foundation for the Doctor of Southwest University of Science and Technology, China (Grant No. 10ZX7127).

† Corresponding author. E-mail: yqgu@ceap.ac.cn