

次稠密等离子体对激光与锥形靶相互作用的影响^{*}

刘占军 郑春阳 曹莉华 李 斌 朱少平

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 8009 信箱, 100088)

(2005 年 2 月 28 日收到, 2005 年 4 月 7 日收到修改稿)

利用三维粒子模拟程序模拟了强激光在锥形靶内的传播情况, 发现锥内次稠密等离子体的存在使激光在锥顶部的最大聚焦强度有所降低, 产生的相对论电子的最大能量和数目增加, 激光在锥壁激发起强的电流和磁场, 次稠密的存在还使锥内产生强的准静态磁场, 磁场的存在使相对论电子速度分布在垂直激光传播方向上表现出各向同性.

关键词: 超强激光脉冲, 锥形靶, 快点火, 粒子模拟

PACC: 5240D, 5240H, 5265

1. 引 言

近年来, 随着啁啾脉冲放大(CPA)技术的发展, 在实验室中可获得强度超过 10^{20} W/cm² 的超短超强激光脉冲, 实验和数值模拟研究都表明, 超强激光脉冲和等离子体相互作用时, 会产生很多新的物理现象, 如高能电子、高能离子和高次谐波以及电磁类孤立子的产生等等^[1-4]. 超短超强激光脉冲在很多方面都有应用, 在惯性约束聚变的快点火中也有应用^[5]. 快点火中的一个关键问题是激光能量转换为相对论电子能量并传输到压缩靶丸. 由于压缩靶丸周围有几百微米长的冕区等离子体, 在这样长的冕区等离子体中, 很难控制激光脉冲的行为, 如激光可能生成丝或各种参量不稳定性^[6-9]. 激光在传播过程中很大一部分能量被消耗掉了, 不能把其大部分能量转换为相对论电子的能量. 锥形靶的设计可以使激光在非常接近压缩靶丸的地方沉积能量. 有实验表明这种方案可以提高中子产额^[10]. 粒子模拟表明, 激光脉冲被锥表面聚焦, 其强度在到达锥的顶部时可以提高几十倍^[11], 在锥顶部产生的相对论电子的数目也比使用平面靶的情况高很多. 激光与固体靶相互作用的实验中, 激光预脉冲足以烧蚀固体靶表面, 形成预等离子体. 在主脉冲和预脉冲的延迟时间内, 预等离子体向外扩张, 在固体靶前面形成一段低密度的等离子体. 因此本文利用三维粒子模拟

程序考察锥形靶中在锥内存在低密度等离子体时对激光与靶相互作用的影响, 讨论锥内次稠密等离子体的存在对激光聚焦强度、准静态磁场及相对论电子产生的影响, 得出的一些结果是有意义的.

2. 三维粒子模拟结果

本文给出的数值模拟结果是用我们自己编写的三维并行全电磁的相对论粒子模拟程序 LARED-P^[12, 13] 计算获得的. 通过自洽的求解 Maxwell 方程和相对论粒子运动方程, 给出激光等离子体相互作用的物理图像, 已在磁场产生、束流不稳定性等方面取得了一些有意义的结果^[12, 13].

2.1. 粒子模拟条件

模拟区域如图 1 所示. 在垂直于激光的传播方向上场和粒子采用周期性边界条件, 沿着激光的传播方向场采用吸收边界条件, 粒子采用反射边界条件. 离子电子质量比 3600, 初始电子、离子温度为 5 keV, 锥等离子体密度为 $5.5 n_c$, $n_c = 1.1 \times 10^{21}$ cm⁻³ 为 $1 \mu\text{m}$ 波长入射光在等离子体中的临界密度. 激光空间包络为高斯型, 强度为 4×10^{18} W/cm², 偏振方向在 z 方向. 模拟系统的横向大小为 $38\lambda/2\pi \times 38\lambda/2\pi$, 纵向为 $60\lambda/2\pi$, λ 为激光在真空中的波长, 分成 $128 \times 128 \times 200$ 个网格. 入射光的传播方向为 y 方向, 振幅在大约三个周期内以高斯形状上升到最大

^{*} 国家高技术研究发展计划及国家自然科学基金(批准号: 10335020, 10375011, 10575015)资助的课题.

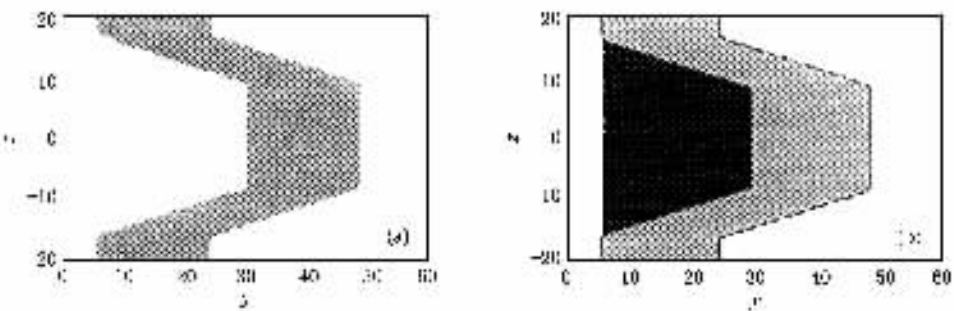


图1 初始等离子体的密度分布在 x 中心处的剖面图 (a) 锥内没有稀薄等离子体的情况 (b) 锥内有稀薄等离子体的情况. 锥内等离子体的密度为 $0.55 n_c$, 为锥体等离子体密度的 $1/10$. 图中标尺刻度的单位为 $\lambda/2\pi$

后维持不变. 我们讨论锥内有次稠密离子体和没有等离子体的两种情况. 锥内次稠密等离子体的密度为 $0.55 n_c$. 初始密度分布如图 1 所示. 总的模拟时间约为 24τ , τ 为激光周期.

2.2. 激光的传播、吸收

由于激光入射到过稠密的锥壁上后, 被反射, 向光束中心汇聚, 所以距锥顶近的地方光束中心的强度较高, 这一点可以从模拟结果中看出, 如图 2 所示. 无论锥内有没有低密度等离子体, 由于锥的作用, 在锥的底部激光强度已经提高了一个量级以上. 激光的偏振方向为 z 方向, 图 2 给出了 xy 平面和 zy 平面上的电磁场的能量密度. 图 2(a)(b) 为锥内没

有次稠密等离子体的情况, 图 2(c)(d) 为锥内有等离子体的情况. 经对比发现激光在偏振面内的吸收情况和垂直于偏振面的平面上的吸收情况有很大的不同. 在激光的偏振面内的吸收效率要比垂直于偏振面的平面上高一些. 在图 2(a) 中入射光被锥壁反射后与原来的入射光叠加在一起导致锥壁附近的强度比较高, 而在偏振面内, 激光被吸收的比较厉害, 并没有出现由于反射而使锥表面附近区域的强度较高(图 2(b)), 因此不同方位上激光的吸收效率和激光偏振方向有关. 而锥内有次稠密等离子体的情况, 激光在传播过程中就被吸收了一部分, 所以最后在锥内的最大聚焦强度要比锥内没有等离子体的情况降低(图 2(c)和(d)). 对比最大聚焦强度, 可以得

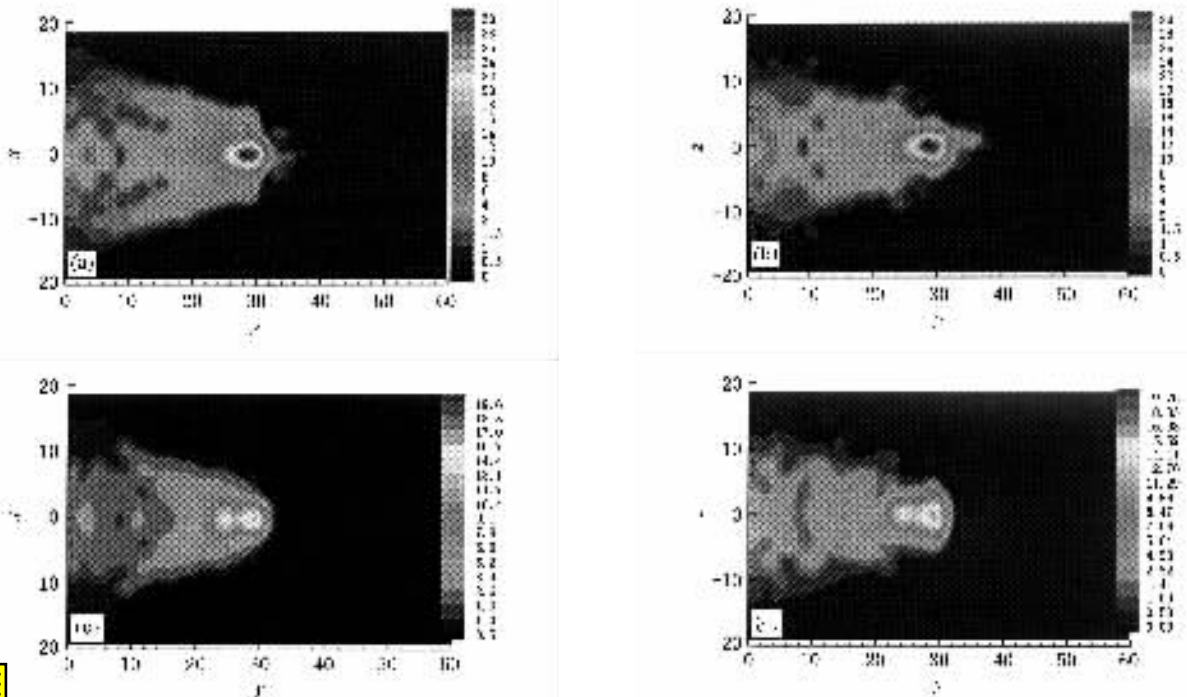


图2 激光能量密度的剖面图, $t = 24\tau$, 在一个激光周期内进行了平均 (a)(b) 为锥内为真空的情况 (c)(d) 为有稀薄等离子体的情况

出,在本文的计算条件下,激光的聚焦强度有所降低,电磁场能量密度为锥内没有次稠密等离子体情况的 1/2 左右.激光能量密度的最大值出现在锥的顶部附近区域约一个激光波长的尺度范围内,其强度无论在何种情况下都超过了入射激光强度一个量级以上.所以锥内次稠密等离子体的存在对激光在锥内的传播、吸收等有很大的影响.

2.3. 磁场的产生

激光在锥内传播的过程中在锥表面激发起很强的电流和磁场,在锥内没有等离子体时有电子沿着锥壁向锥顶运动,形成一层沿着锥壁的电流^[14],另外还有一平行于该电流的反向电流.由于这两股电流的存在,在中间形成一层准静态磁场 B_θ ,如图 3

所示,可以根据锥表面的电流估计锥壁附近磁场的大小,锥表面电流大约为 30 kA,由此产生的磁场大约为 3.0 kT,而模拟的结果大约为 2.5 kT,模拟结果比估计值稍低,主要是由于纵向超热电子逃逸造成的.本文中由于激光焦斑直径及模拟的物理尺寸比文献 [11] 的小,故锥表面的总电流及电流产生的准静态磁场比文献 [11] 的小些.而锥内有等离子体的情况则是在锥内也有强的准静态磁场 B_θ ,对于圆偏振入射光还有一很强的轴向磁场 B_y ,该轴向磁场的大小可以解析求解^[15],且理论公式给出的结果和模拟结构比较接近.关于自身磁场,许多作者通过各种方法做了大量的研究^[15,16],这里我们不再赘述.轴向磁场对相对论电子有箍缩作用,相对论电子沿着轴向磁场做螺旋运动,这在快点火中是非常重要的.

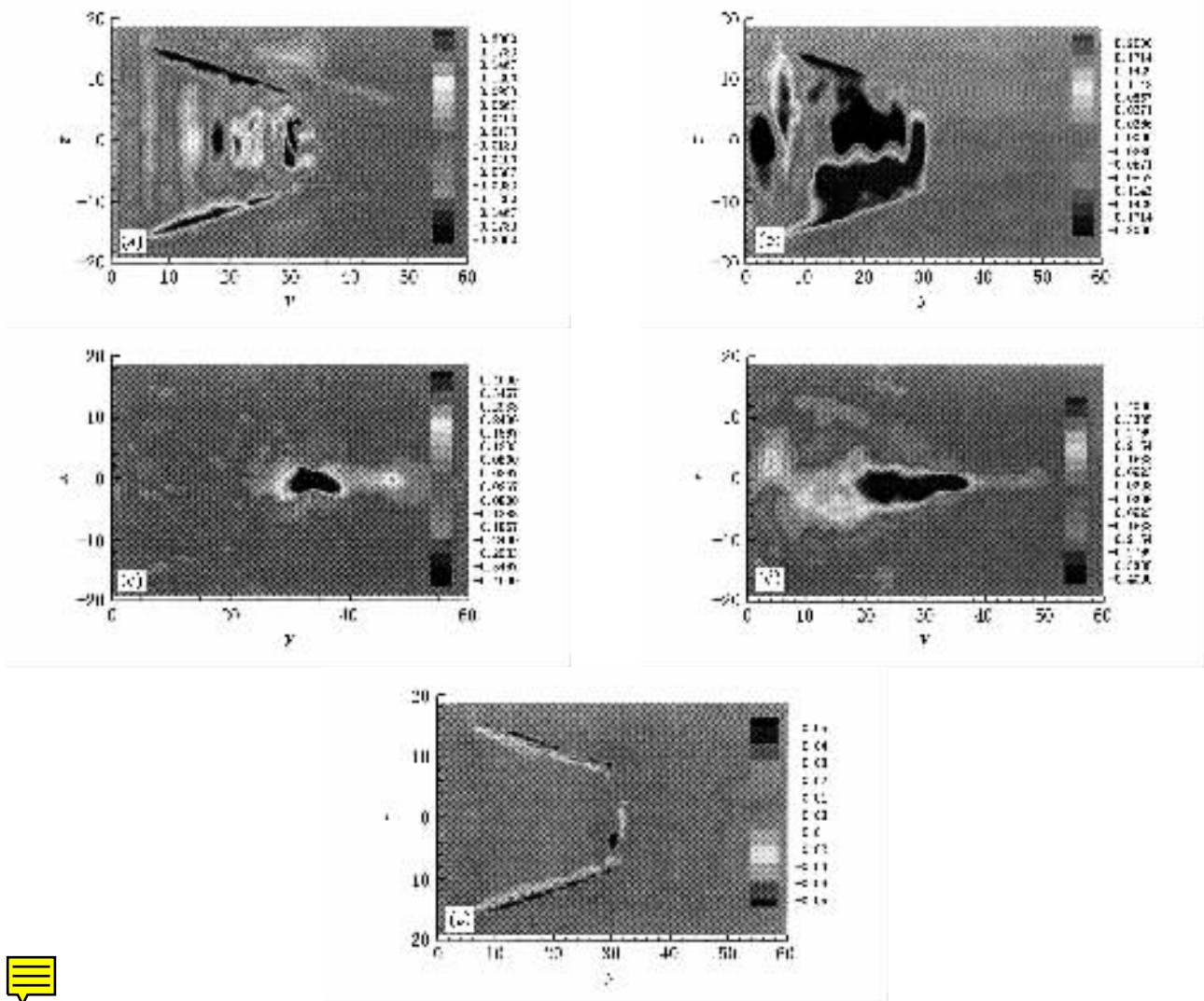


图 3 B_x 在 $t = 10\tau$ 时的剖面图 (a) 锥内没有等离子体 (b) 有等离子体. B_y 在圆偏振入射光下, $t = 20\tau$ 时的剖面图 (c) 锥内没有次稠密等离子体 (d) 锥内有次稠密等离子体. (e) Y 方向电流密度的剖面图,条件同 (a)



2.4. 相对论电子的能谱结构

我们给出沿着激光传播方向运动的电子的角分布,图 4 是相对论电子在不同方位角里电子数目的等值面图,该图只对 $t = 24\tau$ 时能量大于 511 keV 的电子进行了统计.在锥内没有次稠密等离子体的情况下,由于入射光是线偏振的,所以在偏振方向上高能电子的数目比较多.而锥内有次稠密等离子体的情况则与此不同,相对论电子的角分布并没在激光偏振方向上表现出优越性.锥内有次稠密等离子体的情况下产生的相对论电子,经过一段作用时间后,在垂直于传播平面内表现出各向同性.导致各向同性的原因很多,电子动量分布的各向异性可以导致多种不稳定性^[6]的发生,如束流不稳定性、Weibel 不稳定性等,而锥内准静态磁场的产生使相互作用更加复杂,不稳定性及磁场的存在都可能使相对论电子在垂直传播方向的平面内表现出各向同性.由此可见次稠密等离子体的存在使电子的速度分布在

垂直激光传播的方向上表现为各向同性,有利于电子束继续向里穿透.

激光能量被等离子体吸收后很大一部分转换成相对论电子的动能,图 5 是电子动能密度等值面图.电子能量主要集中在锥的顶端,并向里传播,而在锥壁位置上的平均电子能量则比较小.

图 6 给出了电子的能谱,利用锥形靶产生的相对论电子的有效温度约为 470 keV,锥内有次稠密等离子体的情况下的相对论电子的有效温度为 536 keV.而在同样条件下利用平面靶产生的相对论电子的有效温度为 140 keV,所产生的高能电子无论从数量还是能量上看都与锥形靶相差得比较远.而锥内有次稠密等离子体的产生的相对论电子的数目和能量则都更高.所以利用锥形靶可以增加相对论电子的产额,而次稠密等离子体的存在更有利于相对论电子的产生,与文献[2]的结果一致.而大量的相对论电子穿过锥靶后,能量适中的相对论电子可以把能量沉积到靶丸,形成热斑.

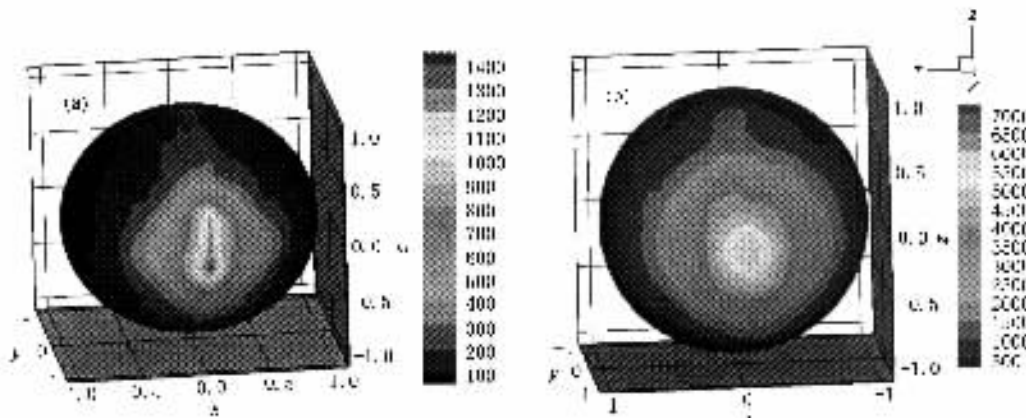


图 4 相对论电子的角分布 (a) 锥内没有次稠密等离子体的情况 (b) 锥内有次稠密等离子体的情况

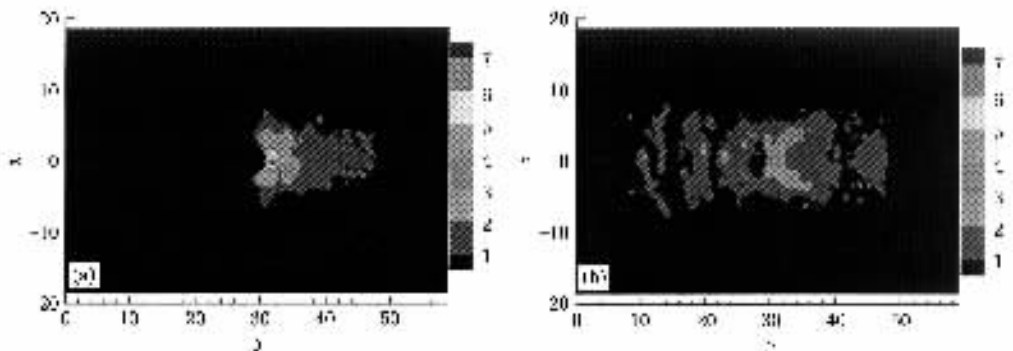


图 5 电子动能密度 $(\gamma - 1)n_e$ 的等值面图, $t = 24\tau$ (a) 锥内没有次稠密等离子体 (b) 锥内有次稠密等离子体

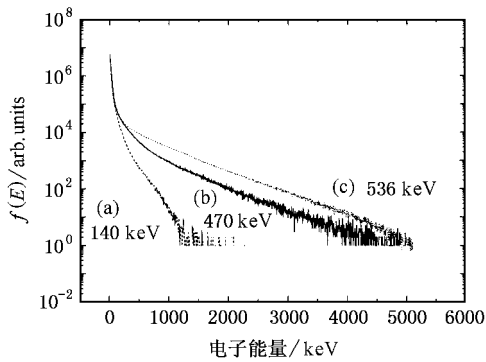


图 6 平面靶 (a), 锥内没有次稠密等离子体 (b), 锥内有次稠密等离子体 (c) 三种情况下的电子能谱, $t = 24\tau$

3. 结 论

我们模拟了强激光与锥形靶的相互作用, 对比了锥内有和没有次稠密等离子体的情况下激光的传播、相对论电子的产生、自生磁场的产生. 结果发现, 激光脉冲被锥形靶的表面聚焦, 最后在锥顶部的激光强度比入射光强度大一个量级以上, 次稠密等离子体的存在使激光在锥顶部的聚焦强度有所降低. 激光在锥壁激发起强的电流和磁场, 一部分电子沿着锥壁向锥顶运动. 锥内次稠密等离子体的存在使锥内产生很强的准静态磁场, 磁场的存在和不稳定性的发生使相对论电子在垂直激光传播方向上表现出各向同性. 次稠密等离子体的存在对激光的吸收更有效, 可以产生更多数量和更高能量的相对论电子.

- [1] Li Y T, Zhang J, Chen L M *et al* 2001 *Acta. Phys. Sin.* **50** 204 (in Chinese) [李玉同、张 杰、陈黎明等 2001 物理学报 **50** 204]
- [2] Yin Y, Yu W, Chang W W *et al* 2004 *High Power Laser and Particle Beams* **16** 50 (in Chinese) [银 燕、余 玮、常文蔚等 2004 强激光与粒子束 **16** 50]
- [3] Li B, Zheng C Y, Zhu S P *et al* 2003 *High Power Laser and Particle Beams* **15** 451 (in Chinese) [李 斌、郑春阳、朱少平等 2003 强激光与粒子束 **15** 451]
- [4] Sheng Z M, Zhang J, Yu W 2003 *Acta. Phys. Sin.* **52** 125 (in Chinese) [盛政明、张 杰、余 玮 2003 物理学报 **52** 125]
- [5] Tabak M, Hammer J, Glinsky M E *et al* 1994 *Phys. Plasmas* **1** 1626
- [6] Pukhov A, Meyer-ter-vehn J 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 3975
- [7] Sentoku Y, Esirkepov T Z, Mima K *et al* 1999 *Phys. Rev. Lett.*

83 3434

- [8] Kodama R, Tanaka K A, Sentoku Y *et al* 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 674
- [9] Fuchs J, Malka G, Adam J C 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 1658
- [10] Kodama R, Norreys P A, Mima K *et al* 2001 *Nature* **412** 798
- [11] Sentoku Y, Mima K, Ruhl H 2004 *Phys. Plasmas* **11** 3083
- [12] Zheng C Y, He X T, Zhu S P 2005 *Phys Plasmas* **12** 044505
- [13] Zheng C Y, Liu Z J, Li J W *et al* 2005 *Acta. Phys. Sin.* **54** 2138 (in Chinese) [郑春阳、刘占军、李继伟等 2005 物理学报 **54** 2138]
- [14] Macchi A, Ruhl H, Comolli F 2000 *Laser and Particle beams* **18** 375
- [15] Zhu S P, He X T, Zheng C Y 2001 *Phys. Plasmas* **8** 321
- [16] Najmudin Z, Tatarakis M, Pukhov A *et al* 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 215004

Influence of under-dense plasma on laser conical target interaction *

Liu Zhan-Jun Zheng Chun-Yang Cao Li-Hua Li Bin Zhu Shao-Ping

(*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics ,Beijing 100088 ,China*)

(Received 28 February 2005 ; revised manuscript received 7 April 2005)

Abstract

The laser light propagation inside the conical target has been studied by three-dimensional particle-in-cell simulations. It is found that the existence of under-dense plasma significantly affects the light propagation and the generation of relativistic electrons. The laser light can be focused at the tip of the cone and the intensity increases up to tens of times in the focal spot. With the under-dense plasma the laser light focused intensity is decreased. The existence of under-dense plasmas favors the relativistic electron generation in the laser conical target interaction in enhancing the number and energy of relativistic electrons.

Keywords : ultra intense laser pulse , conical target , fast ignition , particle-in-cell simulation

PACC : 5240D , 5240H , 5265

* Project supposed by the National High-Tech. ICF Program , and the National Natural Science Foundation of China (Grand Nos. 10335020 ,10375011 , 10575015).