

# 单束激光脉冲俘获及放大机理的理论分析与数值模拟研究\*

邹德滨<sup>1)</sup> 卓红斌<sup>1)†</sup> 邵福球<sup>1)</sup> 银燕<sup>1)</sup> 马燕云<sup>1)</sup> 田成林<sup>1)</sup>  
徐涵<sup>2)</sup> 欧阳建明<sup>1)</sup> 谢翔云<sup>1)</sup> 陈德鹏<sup>1)</sup>

1) (国防科学技术大学理学院核技术研究室, 长沙 410073)

2) (国防科学技术大学计算机学院, 长沙 410073)

(2011年4月6日收到; 2011年5月6日收到修改稿)

本文提出用固体靶前放置薄膜靶来实现激光场放大的新方案, 研究了针对单束激光脉冲条件的俘获及放大机理. 理论模型与数值模拟均表明入射激光能量可以部分地以驻波形式驻留在靶间区域并得到有效放大. 研究表明在入射激光光压、俘获激光光压和电荷分离场的共同作用下, 薄膜靶电子层压缩和膨胀是能量积累存在反复振荡过程的直接原因, 经过振荡后激光脉冲得到稳定俘获.

**关键词:** 激光场放大, 俘获波, 薄膜靶, 粒子模拟

**PACS:** 52.27.Ng, 52.35.Fq, 52.65.Rr

## 1 引言

为探究极端条件下的物理现象, 如 Hawking-Unruh 辐射等, 人们一直寻求更短更强的激光脉冲条件<sup>[1]</sup>. 随着啁啾脉冲放大技术 (chirped pulse amplification) 的发展, 人们已经可以在台面尺度获得脉宽约几十个飞秒、强度高达  $10^{20}$ — $10^{22}$  W/cm<sup>2</sup> 的超短超强激光脉冲<sup>[2]</sup>. 不过, 需要指出的是, 如此高强度的激光远远超过传统光学材料的热损伤阈值 (如钛宝石, 在纳秒激光辐照下的破坏阈值仅为 10 J/cm<sup>2</sup> 量级<sup>[3]</sup>), 因此, 光学元件的损坏问题已成为激光脉冲有效控制 and 强度进一步提高的瓶颈因素. 等离子体作为普通材料电离后的物质形态, 无热损伤阈值, 可以承受更高强度的激光条件. 因此, 近年来利用等离子体作为一种新型的光学介质来控制强光脉冲成为国内外研究的一个热点方向. Doumy 等人采用等离子体镜来聚焦强激光脉冲, 并提高激光脉冲的对比度<sup>[4]</sup>. Bulanov 等人利用相对

论等离子体波聚焦效应来放大激光强度, 甚至可能达到 Schwinger 光强极限  $10^{29}$  W/cm<sup>2</sup>, 如此强度的激光足以在真空中激发正负电子对<sup>[5]</sup>. 武慧春等人提出等离子体光栅由于超宽的带隙和超高的损伤阈值, 可成为一种新的控制超短强激光脉冲的光子器件<sup>[6]</sup>. 上海光机所的沈百飞等人通过对激光与薄膜靶的非线性相互作用进行研究, 提出激发正负电子对、 $\gamma$  光子和产生准单周期相对论激光脉冲等研究设想<sup>[7-9]</sup>. 同时, 他们还发现利用两束对射激光对两个薄膜靶间俘获的类光孤子进行抽运, 可以实现激光场强度放大, 最大幅度接近 100 倍. 相关理论分析和一维粒子模拟结果表明靶间俘获类孤立子波能量累积程度和稳态条件依赖靶间距和双束激光相对相位<sup>[10]</sup>.

本文中, 我们提出一种利用固体靶前放置薄膜靶来实现单束激光脉冲放大的研究方案. 一维稳态理论分析表明, 俘获的电磁能以驻波形式驻留在靶间区域, 其分布形式和最大俘获能量依赖两靶间距

\* 国家自然科学基金委员会 - 中国工程物理研究院联合基金 (批准号: 10976031), 国家自然科学基金 (批准号: 11175253, 10975185) 和国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (批准号: 2007CB815105) 资助的课题.

† E-mail: hongbin.zhuo@gmail.com

等条件. 为验证理论分析结果的正确性, 我们采用一维相对论粒子模拟程序 LPIC++<sup>[11]</sup> 模拟研究激光脉冲放大的整个物理过程. 模拟结果发现在入射激光光压、俘获激光光压和薄膜靶层电荷分离场的共同作用下, 薄膜靶电子层出现明显的压缩和膨胀, 并直接影响入射激光能量与靶间俘获电磁能之间的转换. 在入射归一化激光强度为 0.5、等离子体密度为 100 倍临界密度, 靶间距为 0.016 倍激光波长条件下, 模拟得到的俘获放大的峰值激光强度可以达到 135 倍, 与理论分析结果符合良好.

## 2 理论模型

本文的研究模型如图 1 所示. 考虑单束圆极化激光从左边射向固体靶, 固体靶左端  $\Delta$  处放置薄膜靶, 用于实现激光能量渗透和俘获电磁能. 图中,  $a_1, a_3$  为左端入射波和反射波振幅, 靶间俘获电磁波采用正向波和反向波的叠加表示,  $a_4$  和  $a_5$  分别是各自的振幅. 入射波  $a_1$  与反射波  $a_5$  的光压将初始厚  $\xi_{ad}$  的电子层压缩至  $\xi_{bc}$ , 形成电子耗尽层  $\xi_{ab}$  和  $\xi_{cd}$ . 当系统达到稳态时, 在高密度等离子体电子层  $\xi_{bc}$  中形成倏逝波, 振幅为  $a_2(\xi)$ .

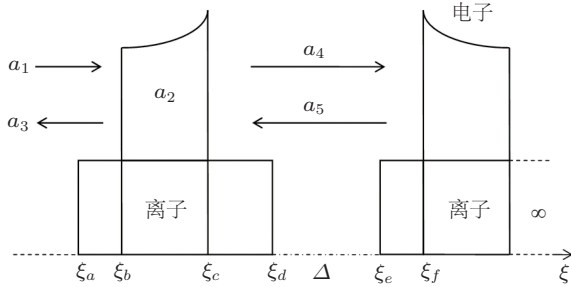


图 1 激光与等离子体相互作用模型

根据文献 [7] 的理论求解方法, 在  $\xi = \omega_0 x/c$  处, 激光场归一化矢势可以表示为  $a = a_0(\xi) \exp[i\omega_0 t + i\theta(\xi)]$ , 其中  $a_0(\xi)$  是振幅,  $\theta(\xi)$  是相位,  $\omega_0$  是激光频率. 在激光场中电子运动的两个运动常数为<sup>[12]</sup>

$$M = (\partial\theta/\partial\xi) \times (\gamma^2 - 1), \quad (1)$$

$$W = \frac{(\partial\gamma/\partial\xi)^2 + M^2}{2(\gamma^2 - 1)} + \frac{\gamma^2}{2} - N_0\gamma, \quad (2)$$

其中  $\gamma = (1 + a^2)^{1/2}$  是圆极化激光的相对论因子,  $N_0$  是以临界密度  $n_c = m_e\omega_0^2/4\pi e^2$  为单位的离子密度;  $M$  描述电子层内激光场的净流量.

这里, 我们仅考虑稳态情况, 即有质动力与电荷分离场达到平衡, 电子纵向速度为 0. 此时, 电子层内激光脉冲的净能量密度为 0, 即  $M = 0$ . 根据横向电磁场的连续性条件, 在边界  $\xi_b$  和  $\xi_c$  处可以得到

$$a_1 = a_3, \quad a_4 = a_5, \quad (3)$$

$$\cos(\phi_{5c} - \phi_{4c}) = a_c^2/2a_4^2 - 1, \quad (4)$$

$$\gamma_b^4 - 2N_0\gamma_b^3 - (2W + 1)\gamma_b^2 + 4a_1^2 + 1 = 0, \quad (5)$$

$$\gamma_c^4 - 2N_0\gamma_c^3 - (2W + 1)\gamma_c^2 + 4a_4^2 + 1 = 0, \quad (6)$$

其中  $\phi_{4c}$  和  $\phi_{5c}$  分别是  $\xi_c$  处光波  $a_4$  和  $a_5$  的相位,  $a_c$  是边界  $\xi_c$  处的振幅,  $\gamma_b$  和  $\gamma_c$  分别是光波  $a_2(\xi)$  在边界  $\xi_b$  和  $\xi_c$  处的相对论因子.

由 (3) 式可知, 稳态时形成的高密度电子层可视为全反射镜, 靶间  $\xi_{cf}$  内夹角为  $\pi$  的光束  $a_4$  与  $a_5$  相互干涉形成驻波, 即俘获波. 考虑激光场放大情况, 即满足  $a_c \ll a_4$ , 则要求薄膜靶置于驻波的波节附近. 根据 (4) 式, 靶间距  $\Delta$  应稍小于  $m\lambda_0/2$ , 其中  $m$  为正整数. 若仅考虑  $\Delta < \lambda_0/2$  时叠加的电磁场, 则两靶间的俘获波振幅可写成

$$a(\xi) = 2a_4 \cos[\xi - (\xi_c + \xi_f)/2]. \quad (7)$$

电子层位移  $\xi_{cd}$  和  $\xi_{ef}$  远小于两靶间距, 驻波结构的波腹近似位于  $\xi = (\xi_d + \xi_e)/2$  处, 则边界处相对论因子可表示为

$$\gamma_c \approx \gamma_d = [1 + 4a_4^2 \cos^2(\Delta\pi/\lambda_0)]^{1/2}. \quad (8)$$

由于薄膜靶电子层内归一化电场和电子层  $\xi_{bc}$  内的密度分布可表示为<sup>[7]</sup>

$$E_x = -\frac{\partial\gamma}{\partial\xi} = [(2W + 2N_0\gamma - \gamma^2)(\gamma^2 - 1)]^{1/2}, \quad (9)$$

$$N_e = \gamma(3N_0\gamma - 2\gamma^2 + 1 + 2W). \quad (10)$$

这样, 利用 (9) 式积分可以求得薄膜靶厚度为

$$\begin{aligned} \xi_{ad} &= \xi_{ab} + \xi_{bc} + \xi_{cd} \\ &= |E_{xb}|/N_0 + |E_{xc}|/N_0 \\ &\quad + \left| \int_{\gamma_b}^{\gamma_c} (-1/E_x) d\gamma \right|. \end{aligned} \quad (11)$$

显然, 利用 (5)—(11) 式, 我们可根据入射激光振幅、薄膜靶厚度、靶密度和两靶间距, 自洽求得稳态下俘获波的振幅  $a(\xi)$  和电子密度分布  $N_e$  等物理量. 为避免薄膜靶直接被入射波击穿, 初始入射激光强度需满足  $a_1 \ll N_0\xi_{ad}/2$ <sup>[13]</sup>.

### 3 模拟结果与讨论

为验证上述理论正确性,我们利用一维粒子模拟程序 LPIC++ 进行了激光场放大过程的数值模拟. 具体模拟条件如下,薄膜靶和固体靶近似为完全电离的均匀等离子体,密度为  $n_0 = 100n_c$ . 薄膜靶厚度为  $d = 0.016\lambda_0$ , 放置位置为  $x = \lambda_0$  处,固体靶前沿位置为  $x = 1.476\lambda_0$ , 两靶间距为  $\Delta = 0.46\lambda_0$ . 考虑圆极化入射激光由左边界垂直入射,激光归一化振幅  $a_1$  在 3 个激光周期内从 0 增长到 0.5, 随后保持不变. 计算网格尺寸为  $\lambda_0/1000$ , 每个网格放置 500 个电子和离子, 其中离子固定不动.

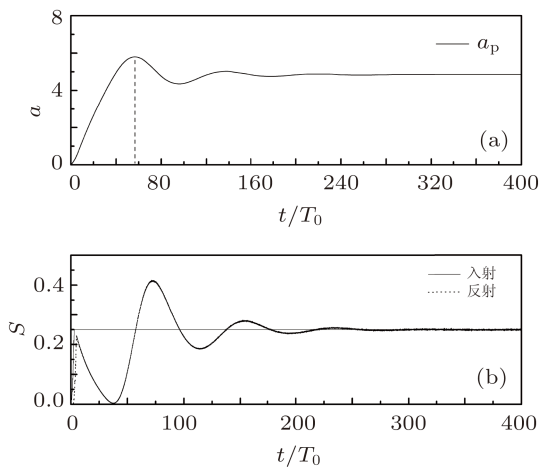


图 2 (a) 靶间电磁波的波峰振幅随时间演化图; (b) 入射通量和反射通量随时间演化图

图 2(a) 为靶间电磁波的波峰振幅随时间演化图. 波峰振幅  $a_p$  从 0 开始增大,  $t = 56T_0$  时达到最大值 5.8, 振幅放大 11.6 倍, 强度放大大约 135 倍, 其中  $T_0$  是激光周期. 56—240 $T_0$  内, 波峰振幅随时间反复波动, 且越来越平缓, 至  $t = 240T_0$  后到达稳态, 形成稳定的俘获波, 波峰振幅保持稳态值 4.9 不变. 图 2(b) 给出入射边界处入射激光与反射激光通量随时间演化图, 其中归一化通量  $S = (e/m_e\omega_0c)^2|\mathbf{E} \times \mathbf{B}|$ . 从图中可看出, 0—56 $T_0$  内, 入射通量高于反射通量, 多数激光能量经由薄膜靶转换成两靶间的电磁波能量, 故图 2(a) 对应的波峰振幅逐渐增大,  $t = 56T_0$  时完成能量积累过程. 56—96 $T_0$  内, 入射通量低于反射通量, 靶间积累的电磁能经由薄膜靶渗漏, 波峰振幅不断降低,  $t = 96T_0$  时完成能量释放过程. 经过反复的积累与释放, 逐渐过渡到入射通量与反射通量保持相等的

稳态, 此时电子层内激光的净能量密度为 0.

对于等离子体薄膜靶, 透明度  $\alpha = \lambda_s/l - l^{-1/2}$ , 它是衡量激光反射和透射程度的物理量, 其中  $\lambda_s = c/\omega_{pe}$  是激光趋肤深度,  $l$  是压缩后的电子层厚度,  $c$  是光速,  $\omega_{pe}$  是等离子体频率 [9]. 模拟中, 当  $t \leq 1T_0$  时, 激光趋肤深度与电子层初始厚度相等. 此时, 若电子层厚度降低, 激光能量以透射为主; 若电子层厚度升高, 能量被薄膜靶反射的部分增加. 图 3(a) 给出 0—200 $T_0$  内薄膜靶中电子密度随时间的变化. 在 0—56 $T_0$  内, 反映出电子层的压缩过程. 1—4 $T_0$  内, 在入射激光有质动力作用下, 电子开始堆积. 沿  $x$  方向压缩电子层, 以致其厚度稍小于激光趋肤深度  $\lambda_s$ , 透明度升高, 加快激光能量的渗透积累.

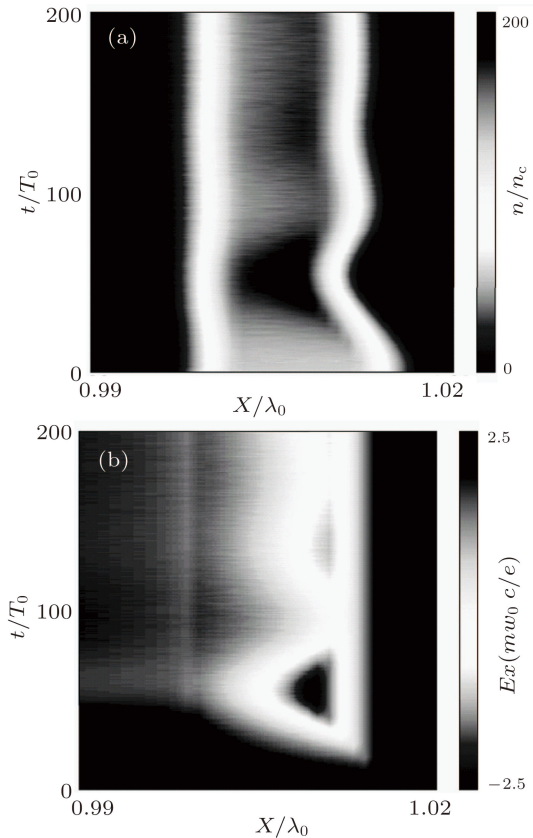


图 3 (a) 薄膜靶内电子密度空间分布的时间演化图; (b) 薄膜靶内电荷分离场空间分布的时间演化图

当两靶间积累的能量逐渐增加, 靶间电磁波开始通过有质动力将薄膜靶后表面电子沿  $-x$  方向驱逐, 形成电子耗尽层, 电子层被强烈地反向压缩, 形成能量积累的正反馈. 直到  $t = 56T_0$  时刻, 电子层最薄, 两靶电子层之间的距离最大, 电磁波的波峰振

幅升至最高,完成“充电”.随着电子耗尽区的变大,电荷分离场开始逐渐增强,如图3(b)所示, $t = 56T_0$ 时增长到最大值.在56—96 $T_0$ 内,反映出电子层的膨胀过程.这时,电荷分离场将起主导作用,将薄膜靶后表面电子沿 $x$ 方向拉回,电子层开始膨胀,透明度逐渐降低.因为靶间电磁场的能量密度远远高于入射激光,所以电子层厚度增加更有利于靶间储存的电磁能经由薄膜靶渗漏, $t = 96T_0$ 时靶间电磁波的峰值振幅降至极小值.可见,薄膜靶后表面的电子在有质动力和电荷分离场作用下,随时间在空间做强烈的反复振荡运动,电子层压缩和膨胀影响激光能量与靶间的电磁能之间的转换.

图4给出稳态时激光场振幅、电子和离子密度分布.从图中可看出,两个高密度电子层内形成俘获波,波峰振幅为4.9,强度仍放大近100倍.为探究两靶间俘获波的基本性质,将模拟得到的峰值振幅代入(7)式中,PIC模拟的靶间俘获波结构与理论预测的驻波结构 $a(\xi) = 4.9 \cos(x - 1.246)$ 完全符合.同时,模拟中还发现俘获波电场峰值处的磁场强度为0,这些都是驻波的明显特征.在 $x < 1.0\lambda_0$ 内,波峰振幅为1.0,说明入射激光全部被反射,高密度电子层已成为全反射镜,入射光与反射光干涉形成驻波.

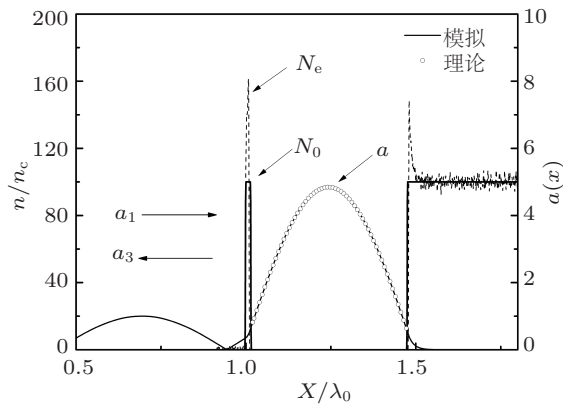


图4 稳态时激光场振幅和粒子密度分布(其中实线对应模拟的电场振幅分布,圆圈符号对应理论的驻波场结构)

以上现象得知,当外加激光持续地入射到等离子体薄膜靶,激光能量可以经由薄膜靶渗透积累,靶间电磁波振幅增加,电磁能积累到一定程度后并没有直接进入稳态.电子在有质动力与电荷分离场作用下来回运动,电子层进行反复的压缩和膨胀,调整靶间电磁波能量的积累和释放,振荡后逐渐过渡到稳态,靶间形成驻波形式的俘获波.稳态情况下,激光有质光压与耗尽区静电压平衡,电子纵向

速度消失,俘获波振幅保持不变.这种现象与电容的充电和放电过程很相似,但等离子体不同于普通电容介质,对外界扰动或涨落存在响应振荡频率,通过相对论效应和有质动力效应,还将出现大量的波-波耦合、波-粒子耦合等,激光的能量转换为粒子的能量和其他波能<sup>[14]</sup>.而且等离子体作为非线性介质进行储能和控制强光脉冲,存在这种能量吞吐的振荡特性.从能量角度上看,激光场放大的实质是以消耗连续的低强度抽运激光为代价,换取靶间电磁场强度的增加.

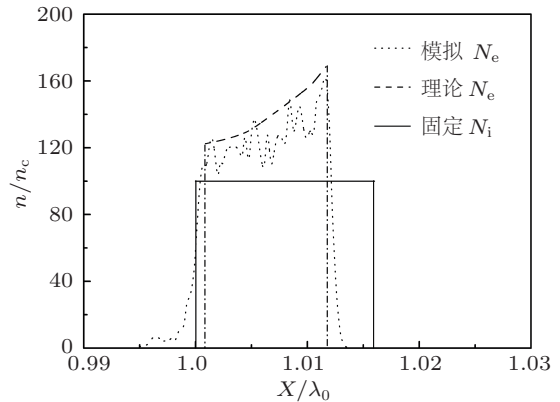


图5 稳态时理论和模拟的粒子密度分布(圆点对应模拟的电子密度分布,虚线对应理论中电子密度分布,实线对应离子密度分布)

表1 图6(b)对应的粒子模拟参数

$a_1$	0.5	1	1.5	2	2.5	3
$N_0$	100	80	67	61.5	60	57
$d/\lambda_0$	0.016	0.020	0.024	0.026	0.027	0.028

图5给出了稳态时理论和模拟的粒子密度分布,可以看到入射激光和两靶间电磁波有质光压作用下,沿 $x$ 正反两方向推动薄膜靶中的电子,形成电子耗尽区和更高密度的电子层.同时,理论预测的电子密度分布与粒子模拟结果比较符合.

图4中稳态下俘获波的波峰振幅为4.9,理论结果5.2与模拟结果比较一致.改变靶间距,波峰振幅的放大情况如图6(a)所示,说明两靶间距稍小于半个激光波长时,激光场振幅得到明显放大,并且理论与模拟结果比较符合.特别地,靶间距 $\Delta = 0.455\lambda_0$ 时,振幅放大13倍,强度放大近200倍.之后改变入射光强、靶厚度和密度等一系列参数(如表1),图6(b)可看到稳态时俘获波的峰值振幅放大情况,理论模型与数值模拟结果一致.



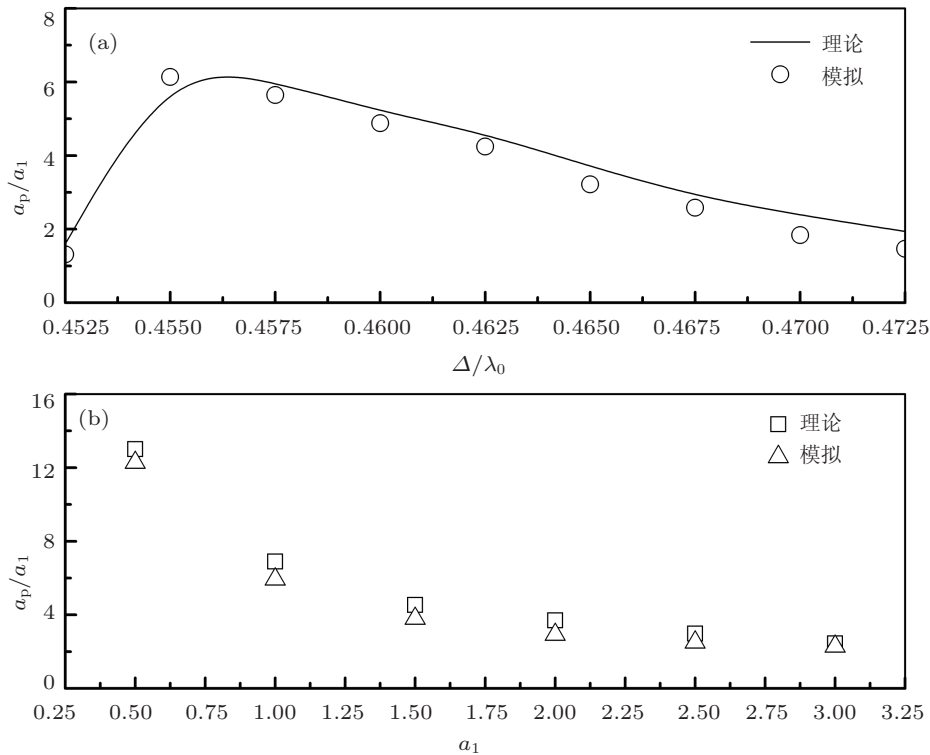


图 6 (a) 改变靶间距, 稳态时俘获波的波峰振幅放大比 (其中实线对应理论结果, 圆形符号对应模拟结果); (b) 稳态时, 俘获波的波峰振幅放大比 (其中方形符号对应理论结果, 三角形符号对应模拟结果)

### 4 结论

本文采用理论分析和粒子模拟相结合的方法研究了单束强激光脉冲的俘获及放大机理. 采用固体靶前放置薄膜靶的特定结构实现有效俘获激光脉冲能量并实现激光场量级放大. 一维理论模型得到描述稳态下俘获波的振幅和电子密度分布等物理量与给定入射激光振幅、薄膜靶厚度、靶密度和两靶间距关系的表达式. 一维粒子模拟结果表明: 在入射激光光压、俘获激光光压和电荷分

离场的共同作用下, 薄膜靶电子层压缩和膨胀是能量积累存在反复振荡过程的直接原因, 经过振荡后激光脉冲得到稳定俘获, 其俘获波以驻波的形式存在. 一系列粒子模拟结果与理论分析稳态解一致, 验证理论模型正确性. 其中, 在入射归一化激光强度为 0.5、等离子体密度为 100 倍临界密度, 靶间距为 0.016 倍激光波长条件下, 模拟得到的俘获放大的峰值激光强度可以达到 135 倍.

十分感谢中科院上海光学精密机械研究所沈百飞研究员和吉亮亮博士的帮助和有益讨论.

[1] Unruh W 1976 *Phys. Rev. D* **14** 870  
 [2] Mourou G A, Barty C P J, Perry M D 1998 *Physics Today* **51** 22  
 [3] Fun Y, Zhang Q, Gong H 1994 *Laser Induce Damage in Optical Materials* **1** 2114  
 [4] Doumy G, Quéré F, Gobert O, Perdrix M, Martin Ph, Audebert P, Gauthier J C, Geindre J P, Wittmann T 2004 *Phys. Rev. E* **69** 026402  
 [5] Bulanov S V, Esirkepov T, Tajima T 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 085001  
 [6] Yu L L, Sheng Z M, Zhang J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6457 (in Chinese) [於陆勒, 盛正明, 张杰 2008 物理学报 **57** 6457]  
 [7] Shen B F, Meyer-ter-Vehn J 2001 *Phys. Plasmas* **8** 1003  
 [8] Shen B F, Meyer-ter-Vehn J 2001 *Phys. Rev. E* **65** 016405  
 [9] Ji L L, Shen B F, Zhang X M, Wang F C, Jin Z Y, Xia C Q, Wen M, Wang W P, Xu J C, Yu M Y 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 215005  
 [10] Shen B F, Yu M Y 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 275004  
 [11] Lichters R, Pfund R E W, Meyer-ter-Vehn J 1997 *LPIC++ Max-Planck- Institut für Quantenoptik Report No.MPQ225* Garching, Germany  
 [12] Lai S C 1976 *Phys. Rev. Lett.* **36** 966  
 [13] Yan X Q, Lin C, Sheng Z M, Guo Z Y, Liu B C, Lu Y R, Fang J X, Chen J E 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 135003  
 [14] Sheng Z M, Zhang J, Yu W 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 0125 (in Chinese) [盛正明, 张杰, 余玮 2003 物理学报 **52** 0125]

# Theory and simulation of laser pulse trapping and amplifying in the interaction with a thin foil and a solid target\*

Zou De-Bin<sup>1)</sup> Zhuo Hong-Bin<sup>1)†</sup> Shao Fu-Qiu<sup>1)</sup> Yin Yan<sup>1)</sup> Ma Yan-Yun<sup>1)</sup>  
Tian Cheng-Lin<sup>1)</sup> Xu Han<sup>2)</sup> Ouyang Jian-Ming<sup>1)</sup> Xie Xiang-Yun<sup>1)</sup> Chen De-Peng<sup>1)</sup>

1) (college of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

2) (college of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Received 6 April 2011; revised manuscript received 6 May 2011)

## Abstract

In this paper we suggest a simple structure consisting of a thin foil and a solid target with specified gap width to achieve the laser-field amplification, and study the trapping process of a single pulse. Both the theoretical and simulation results show that the EM fields are trapped as standing waves between two layers of enhanced electron density. The laser energy can be accumulated like the accumulation of charges in capacitor, a stably trap is reached after several oscillations. The compressing and the expanding of the electron layer, generated by the incident light pressure, the trapped light pressure and the charge electrostatic fields, are the direct reason for the energy oscillations.

**Keywords:** laser-field amplification, foil, trapped wave, particle-in-cell simulation

**PACS:** 52.27.Ng, 52.35.Fq, 52.65.Rr

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China-NSAF(Grant No. 10976031), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11175253, 10975185), and the National Basic Research Program of China(Program 973)(Grant No. 2007CB815105).

† E-mail: hongbin.zhuo@gmail.com