

薄膜靶整形强激光脉冲的理论分析和数值模拟

邹德滨 卓红斌 邵福球 马燕云 银 燕 欧阳建明 余同普 杨晓虎

(国防科学技术大学理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 超强超短脉冲激光广泛应用于粒子加速以及新型 X 射线辐射源产生。较长的激光脉冲上升前沿直接影响激光应用效果。等离子体薄膜靶作为新型光学介质开关,可以有效降低超强激光脉冲前沿上升时间,优化激光等离子体相互作用参数。采用一维理论分析和粒子模拟方法研究了等离子体薄膜靶实现超强激光脉冲整形的机制。研究结果表明,薄膜靶通过对激光脉冲的非线性调制,可有效实现脉宽缩短和脉冲陡化;对比单层靶调制结果,选择参数优化的双层靶,可进一步优化脉冲整形效果,获得更短脉宽和更高振幅的激光脉冲;对于峰值振幅高于薄膜靶击穿阈值的超强激光,脉冲上升前沿可得到明显陡化,薄膜靶的击穿是产生这种脉冲整形效果的直接原因。

关键词 激光光学;脉冲整形;薄膜靶;优化;粒子模拟

中图分类号 O53 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0714001

Laser-Pulse Shaping in the Interaction of Ultra-Intense Laser Pulses with Ultra-Thin Foils

Zou Debin Zhuo Hongbin Shao Fuqiu Ma Yanyun Yin Yan Ouyang Jianming
Yu Tongpu Yang Xiaohu

(College of Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Powerful lasers are used to drive plasmas in next-generation particle accelerators and X-ray beams. One shortcoming of these beams is that they typically have a range of energy, caused by the gradual rise of laser power from zero to its maximum level. Using plasma foil as an optical switch, this rising time can be reduced effectively, delivering peak laser power to the plasma on a faster time scale. The method of laser-pulse shaping in the interaction of ultra-intense laser pulses with ultra-thin foils is studied by one-dimensional analytical theory and particle-in-cell simulation. Research results indicate that the pulse can be steepened and its width can be shortened effectively due to the self-consistent nonlinear modulation. In comparison to a single foil, a suitable double-foil scheme could optimize the shaping effect, and a transmitted pulse with both shorter duration and larger amplitude is obtained. When the peak amplitude of the incident pulse is higher than the smash threshold of the foil, the rising time of the shaped pulse could be shortened a lot, and the smash of the foil is the direct reason for this shaping effect.

Key words laser optics; laser-pulse shaping; foils; optimization; particle-in-cell simulation

OCIS codes 140.3300; 140.3380; 140.3460; 140.3538

1 引言

随着啁啾脉冲放大技术的飞速发展,人们已经在台面尺度获得脉宽约几十飞秒、强度高达 $10^{20} \sim 10^{22} \text{ W/cm}^2$ 的超短超强激光脉冲^[1]。如此高

强度的激光与固体薄靶相互作用,能够有效加速离子并获得高质量的单能离子束^[2~8]。一系列研究结果表明,激光脉冲波形(特别是激光脉冲上升前沿)是影响高效离子加速的关键问题之一^[5,6]。例如,

收稿日期: 2011-12-31; **收到修改稿日期**: 2012-02-18

基金项目: 国家自然科学基金(11175253)和高等学校博士学科点专项科研基金博导类(20114307110020)资助课题。

作者简介: 邹德滨(1987—),男,博士研究生,主要从事激光与等离子体相互作用等方面的研究。

E-mail: debinzou@126.com

导师简介: 卓红斌(1973—),男,副研究员,主要从事激光与等离子体相互作用等方面的研究。

E-mail: hongbin.zhuo@gmail.com(通信联系人)

较长的激光脉冲上升前沿能够导致等离子体薄膜靶中的电子过分加热或激发各类不稳定性,从而破坏薄膜靶的整体结构,最终直接导致稳定的激光离子加速过程终止^[7,8]。Wang等^[5]通过对稳相加速(PSA)机制的研究发现,优化激光脉冲前沿的上升时间,能够有效抑制各类不稳定性的发生,从而有效加速并获得吉电子伏量级的单能质子束。

优质脉冲需求直接导致目前对脉冲整形技术的要求越来越高。由于传统的激光脉冲整形方法基于普通光学元件^[9,10],存在热损伤阈值的限制,因此,无热损伤阈值的等离子体作为一种新型光学介质来实现强光脉冲操控,已成为国内外研究的热点方向。例如,Shan等^[11]利用等离子体的相对论自诱导透明来缩短激光脉冲宽度和上升时间;Ji等^[12]通过等离子体薄膜靶对超短超强激光脉冲进行非线性调制,获得脉宽约4 fs、峰值强度达 3×10^{20} W/cm²的准单周期相对论激光脉冲。值得注意的是,上述研究工作中激光整形均是以能量衰减为代价而换取更

短的脉冲宽度,因此整形后激光脉冲的能量要远低于入射激光脉冲能量,这显然限制了下一步利用整形激光脉冲实现粒子加速的最终效果。

本文系统研究了等离子体薄膜靶实现超强激光脉冲整形的机制,并提出了利用双层靶优化整形效果的物理设想。

2 理论分析

研究模型如图1所示,考虑单束圆极化激光脉冲从左边射向 n 层周期性结构的超临界密度等离子体薄膜靶,忽略离子运动,薄膜靶间距选择为 $\Delta > 2ct_{up}$,其中 t_{up} 为入射激光上升时间。激光脉冲的振幅随时间缓慢变化, $t = t_{up}$ 时增加到峰值振幅 a_p ,然后降至0, $a = eE/(m\omega_0 c)$ 为归一化激光电场振幅, e 和 m 分别为电子的电荷和质量, E 为激光电场强度, ω_0 为激光频率, c 为光速。对于这种振幅缓变的脉冲,定义 $\chi = a_p/\tau$ 为陡度,用于衡量脉冲陡峭程度,其中 τ 为激光周期 T_0 归一化的脉冲半峰全宽(FWHM)。

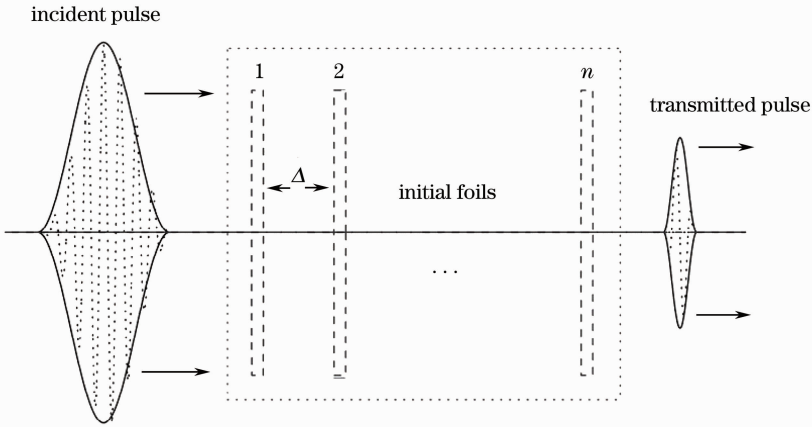


图1 激光与薄膜靶相互作用模型

Fig. 1 Laser-pulse shaping model

考虑 $\epsilon_0 < a_p \leq 2\epsilon_0$ 的相对论强激光脉冲 $a_0 = a_p \sin^2[\pi t/(2t_{up})]$ 射向 $\epsilon_0 > 1$ 的单层等离子体薄膜靶情况。当薄膜靶的厚度 d 接近趋肤深度 d_s 或波长 λ_0 量级,根据文献^[13]的理论结果,透射光 a_t 和反射光 a_r 可以表示为

$$a_t = (1/2)^{1/2} \{ [(1 + \epsilon_0^2 - a_0^2)^2 + 4a_0^2]^{1/2} - (1 + \epsilon_0^2 - a_0^2) \}^{1/2}, \quad (1)$$

$$a_r = (a_0^2 - a_t^2)^{1/2}, \quad (2)$$

式中 $\epsilon_0 = \pi ND$ 为描述等离子体薄膜靶透明性的物理参量, $N = n_0/n_c$ 为归一化等离子体薄膜靶密度, n_0 为靶初始密度, n_c 为临界密度, $D = d/\lambda_0$ 为归一化薄膜靶厚度。

对于 n 层等离子体薄膜靶情况,近似认为各个薄膜的非线性物理特性完全一致,则利用(1)式可以得到最终透射光 a_t 的归一化振幅为

$$a_n = (1/2)^{1/2} \{ [(1 + \epsilon_0^2 - a_{n-1}^2)^2 + 4a_{n-1}^2]^{1/2} - (1 + \epsilon_0^2 - a_{n-1}^2) \}^{1/2}. \quad (3)$$

显然,在已知入射激光 a_0 和等离子体薄膜靶参数 ϵ_0 的条件下,可以利用(3)式,采用迭代的方法计算得到透射激光脉冲振幅 a_n 。

图2(a)给出了利用(3)式得到的单层薄膜靶整形后的激光脉冲,其中入射激光脉冲为 $a_0 = 10 \sin^2[\pi t/(30T_0)]$,等离子体薄膜靶参数为 $\epsilon_0 = 5$, a_t 为透射脉冲激光场振幅, a_r 为反射脉冲激光场振

幅。图 2 中显示,对于入射激光脉冲时间包络中 $a < 5$ 的部分,绝大多数被薄膜靶反射;而对于 $a > 5$ 的高振幅部分,基本透过薄膜靶。透射光 a_t 的峰值振幅为 $a_t = 8.7$,脉冲宽度 τ 由 $11T_0$ 缩短为 $9T_0$,陡度为 $\chi_t \approx 0.97$,略高于入射光 a_0 的陡度 $\chi_0 \approx 0.91$ 。显然,利用 $a = \epsilon_0$ 的关系,可以定量描述激光相对论自

诱导透明的开关特性: $a > \epsilon_0$ 时,薄膜靶等离子体呈现“打开”状态,使得入射激光中 $a > \epsilon_0$ 的较高振幅部分有效透过薄膜靶; $a < \epsilon_0$ 时,薄膜靶等离子体呈现“关闭”状态,入射激光中 $a < \epsilon_0$ 的部分被薄膜靶反射,最终导致透射脉冲有相对缩短的脉宽和更加陡峭的前后沿。

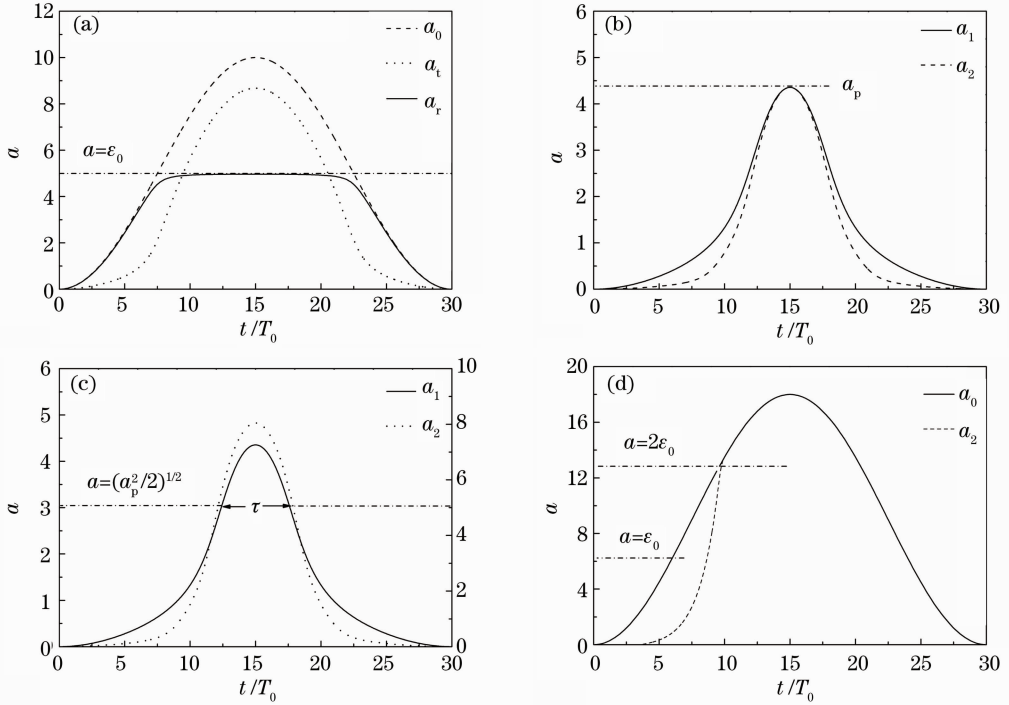


图 2 (a) 当 $1 \ll a_p < 2\epsilon_0$ 时,单层薄膜靶整形后的激光场; (b) 透射光峰值振幅相同时,单、双层薄膜靶整形后的透射脉冲激光场; (c) 透射光脉宽相同时,单、双层薄膜靶整形后的透射脉冲激光场; (d) 当 $a_p > 2\epsilon_0$ 时,双层薄膜靶整形后的透射脉冲激光场

Fig. 2 (a) Shaped laser field of a single foil in the case of $1 \ll a_p < 2\epsilon_0$; (b) shaped laser fields of a single foil and double foils with the peak amplitude of the transmitted pulses equal; (c) shaped laser fields of a single foil and double foils with the duration of the transmitted pulses equal; (d) shaped laser field of double foils in the case of $a_p > 2\epsilon_0$

利用(3)式,讨论双层靶整形激光的效果,初始入射激光参数与图 2(a)相同。为了对比双层靶和单层靶的脉冲整形效果,选择两种计算情况:1)单、双层靶整形透射波的峰值振幅相等,如图 2(b)所示;2)单、双层靶整形后的透射脉冲宽度相同,如图 2(c)所示。在透射波振幅均为 $a_p = 4.35$ 的条件下,单层靶参量为 $\epsilon_1 = 9.24$,整形后的透射光脉宽(实线)为 $\tau_1 = 5.08T_0$,陡度为 $\chi_1 \approx 0.856$;对于参量 $\epsilon_2 = 6.47$ 的双层靶,整形后的透射光脉宽(虚线)为 $\tau_2 = 4.7T_0$,陡度为 $\chi_2 \approx 0.926$,大于 χ_1 。在透射波脉宽均为 $\tau = 5.08T_0$ 的条件下,单层靶参量为 $\epsilon_1 = 9.24$,整形后的透射光振幅(实线)为 $a_{1,p} = 4.35$,陡度为 $\chi_1 \approx 0.856$;参量 $\epsilon_2 = 2\pi$ 的双层靶,整形后的透射光振幅(虚线)为 $a_{2,p} = 4.83$,陡度为 $\chi_2 \approx 0.9$,大于 χ_1 。显然,两种计算情况下的双层靶整

形均获得比单层靶更陡的透射效果。

另外,考虑激光脉冲的峰值振幅高于薄膜靶击穿阈值的情况,即 $a_p > 2\epsilon_0$ 。对于入射激光中 $a \leq \epsilon_0$ 的部分,等离子体薄膜靶将以反射为主;对于 $\epsilon_0 < a \leq 2\epsilon_0$ 的部分,仍属于薄膜靶调制范围,可利用(3)式计算得到透射光脉冲振幅分布;当激光强度大于电荷分离场的最大值时,即 $a > 2\epsilon_0$ ^[2],全部电子在激光光压的作用下脱离薄膜靶,使得薄膜靶被击穿,从而失去对剩余脉冲的非线性调制作用。图 2(d) 给出激光 $a_0 = 18\sin^2[\pi t/(30T_0)]$ 经过 $\epsilon_0 = 2\pi$ 的双层靶的整形脉冲效果,其中实线代表入射脉冲的激光场 a_0 ,点线代表透射脉冲的激光场 a_2 。从图 2 可以看出,脉冲中 $a < 2\pi$ 的部分基本被薄膜靶反射, $2\pi \leq a < 4\pi$ 的部分得到薄膜靶的非线性调制,剩余部分未经过调制而继续传播。脉冲的上升时间 t_{up} 由

15 T_0 缩短到 10 T_0 ，整形后的脉冲上升时间得到明显缩短。

3 模拟结果与讨论

为验证理论计算结果的正确性,以图 2(c)所示的激光和薄膜靶条件,利用一维粒子模拟程序 LPIC++^[14]进行激光脉冲整形过程的数值模拟。具体模拟条件如下:圆极化入射激光 $a_0 = 10\sin^2[\pi t/(30T_0)]$ 从左边垂直入射到薄膜靶,波长为 $\lambda_0 = 1 \mu\text{m}$ 。薄膜靶均近似为完全电离的均匀氢等离子体,密度为 $n = 4n_c$ 。对于厚度为 $d = 0.735\lambda_0$ 的单层靶情况,薄膜靶前沿位于 $x = 50\lambda_0$ 。对于厚度均为 $d = 0.5\lambda_0$ 的双层靶情况,第一层薄膜靶前沿位于 $x = 50\lambda_0$,第二层薄膜靶前沿位于 $x = 100.5\lambda_0$,两靶间距为 $\Delta = 50\lambda_0$ 。计算网格尺寸为 $\lambda_0/200$,每个网格分别放置 500 个电子和离子。

图 3(a)给出 $a_p = 10$ 时模拟得到的利用单、双层薄膜靶分别整形后的激光场,其中实线代表单层靶的整形脉冲 a_1 ,点线代表 $t = 140T_0$ 时刻双层靶的

整形脉冲 a_2 。单层薄膜靶整形后的透射光脉宽约为 $\tau_1 = 4.0T_0$,与双层靶结果 $\tau_2 = 3.2T_0$ 大致相等。双层靶的整形脉冲峰值振幅为 $a_{2,p} = 2.7$,陡度为 $\chi_2 \approx 0.844$,远高于单层靶整形结果 $a_{1,p} = 1.35$, $\chi_1 \approx 0.34$ 。从能量角度看,利用双层靶整形后的透射光能量约为单层靶情况的 4 倍,优化靶参数条件下的双层靶结构能够获得明显优于单层靶的脉冲整形效果。为考虑薄膜靶击穿对脉冲整形的影响,改变入射激光的峰值振幅为 $a_p = 18$ 。图 3(b)给出 $a_p = 18$ 时模拟得到的双层薄膜靶的整形脉冲激光场(拟合后),其中实线代表入射脉冲激光场 a_0 ,虚线代表 $t = 148T_0$ 时刻透射脉冲激光场 a_t 。从图 3 可以看到,此时的脉冲整形效果与理论结果图 2(d)保持一致,脉冲尾部中 $a < 6.4$ 的部分基本被反射, $6.4 \leq a < 12.8$ 的部分得到调制,剩余部分未经过调制而继续传播。相应地,脉冲上升时间 t_{up} 由 15 T_0 缩短到 8 T_0 ,薄膜靶整形的强激光脉冲的上升时间得到明显缩短。

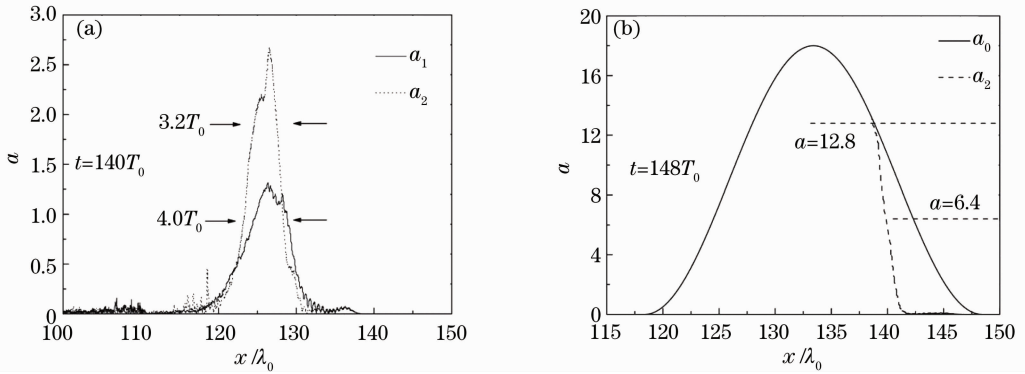


图 3 单、双靶调制后的透射脉冲激光场。(a) $a_p = 10$; (b) $a_p = 18$

Fig. 3 Shaped laser field of a single foil and double foils from simulation. (a) $a_p = 10$; (b) $a_p = 18$

图 4(a)和(b)给出 $a_p = 10$ 情况下,双层靶中第一层薄膜靶的电子和离子在 $48T_0 \sim 100T_0$ 内的密度演化过程。 $t = 50T_0$ 时,激光入射到第一层靶前表面,通过有质动力向前推动电子,压缩形成高密度的相对论电子镜^[15]。 $t = 58T_0$ 时,电子层被压缩至最薄,如图 4(a) 所示。因为电子质量远小于离子质量,所以电子将通过库仑场带动离子基本以双层结构同步向前运动^[12]。 $t = 70T_0$ 后,双层结构的运动速度接近 $v/c \approx 0.25$ 。入射激光脉冲受到运动中薄膜靶的调制,靶的运动将会相对延长薄膜靶对激光脉冲的调制时间。比较图 2(c)与图 3(a)发现,模拟得到的整形脉冲不同于理论预测的对称结构,存在一个更为陡峭的尾部。产生这种现象主要有两个方面的

原因:首先,薄膜靶运动引起的多普勒效应将会降低激光有质动力,削弱电子层的压缩,薄膜靶透明度相对降低,导致脉冲出现一个陡峭的尾部^[10];其次,在激光时间下降沿部分与薄膜靶相互作用时,电子的有质动力沿 $-x$ 方向,同时电子层和离子层中的粒子受到很强的库仑排斥作用^[13],使得少部分电子逃离向前运动的电子层,且带动一部分离子脱离了薄膜靶,使得薄膜靶参量 $\epsilon_0 = \pi ND$ 降低,对激光脉冲的整形作用相对于激光脉冲的时间上升沿明显变弱。图 4(a)和(b)显示从 $t = 80T_0$ 时刻开始,小部分电子逃离相对向前运动的薄膜靶而反向运动,同时一部分离子也逃离了薄膜靶,但绝大部分粒子继续向前运动。图 2(c)所示双层靶整形的脉冲峰值振

幅 $a_{2,p} \approx 4.83$ 高于图 3(a) 中的模拟值 $a_{2,p} \approx 2.7$, 这与理论中未考虑薄膜靶的运动及少量逃逸粒子引起的能量损耗相关。

图 4(c) 和 (d) 给出 $a_p = 18$ 情况下, 双层靶中第一层薄膜靶的电子和离子在 $48T_0 \sim 100T_0$ 内的密度演化过程。 $t = 58T_0$ 时, 薄膜靶被压缩最薄。之后, 激光场振幅高于电荷分离场的最大值, 薄膜靶被

击穿, 全部电子脱离薄膜靶。 $58T_0 \sim 80T_0$ 内, 薄膜靶的电子和离子在有质动力和电荷分离场作用下, 随时间在空间做反复地无规则振荡运动。 $t > 80T_0$ 时, 当激光完全通过电子层和离子层, 电子和离子弥漫于周围空间。靶击穿后, 对激光不再有脉冲调制作用, 薄膜靶的击穿效应是产生脉冲上升沿陡化的直接原因。

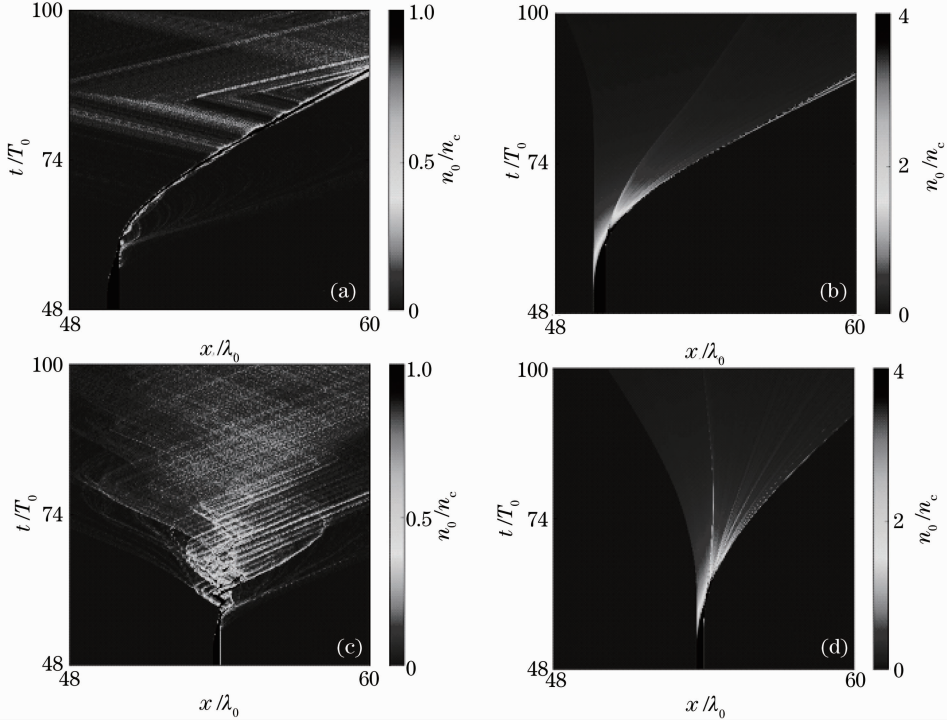


图 4 双层薄膜靶的(a)、(c)电子和(b)、(d)离子密度随时间的变化

Fig. 4 Temporal evolutions of (a), (c) electron and (b), (d) ion density distribution of the front foil

只讨论了薄膜靶对圆极化激光脉冲整形情况, 对于线极化激光, 有质动力中含有振荡项, 会使得等离子体中超热电子温度升高, 薄膜靶很容易在激光有质动力作用下破掉, 从而失去对激光脉冲的非线性调制作用。

4 结 论

采用理论分析和粒子模拟相结合的方式研究了超临界密度等离子体薄膜靶对激光脉冲的整形过程。研究表明, 薄膜靶对激光有良好的整形效果, 通过对激光脉冲的非线性调制, 可有效实现脉宽缩短和脉冲陡化。双层靶的脉冲整形效果远好于单层靶, 透射光峰值振幅相同时, 双层靶调制后的激光脉宽更小; 透射光脉宽相同时, 双层靶调制后的激光脉冲振幅更高。利用优化参数的双层薄膜靶代替单层靶进行脉冲整形, 可大幅减少激光振幅衰减, 缩短激光脉冲和实现脉冲陡化。对于峰值振幅高于薄膜

靶击穿阈值的强激光, 仅脉冲时间上升沿得到明显陡化, 薄膜靶的击穿是产生这种脉冲整形效果的直接原因。

致谢 感谢中国科学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。

参 考 文 献

- 1 G. A. Mourou, C. P. J. Barty, M. D. Perry. Ultrahigh-intensity lasers: physics of the extreme on a tabletop[J]. *Phys. Today*, 1998, **51**(1): 22~28
- 2 Yan Xueqing, Lin Chen, Sheng Zhengming *et al.*. Generating high-current monoenergetic proton beams by a circularly polarized laser pulse in the phase-stable acceleration regime[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **100**(13): 135003
- 3 L. Yin, B. J. Albright, B. M. Hegelich *et al.*. GeV laser ion acceleration from ultrathin targets: the laser break-out afterburner[J]. *Laser Part. Beams*, 2006, **24**(2): 291~298
- 4 Yin Yan, Yu Wei, Yu Mingyang *et al.*. Influence of target thickness on the generation of high-density ion bunches by ultrashort circularly polarized laser pulses[J]. *Phys. Plasmas*,

- 2008, **15**(9): 093106
- 5 Wang Wenpeng, Shen Baifei, Zhang Xiaomei *et al.*. Efficient acceleration of monoenergetic proton beam by sharp front laser pulse[J]. *Phys. Plasmas*, 2011, **18**(1): 013103
- 6 Zhang Xiaomei, Shen Baifei, Jin Zhangying *et al.*. Generation of plasma intrinsic oscillation at the front surface of a target irradiated by a circularly polarized laser pulse [J]. *Phys. Plasmas*, 2009, **16**(3): 033102
- 7 Zhuo Hongbin, Chen Zhenglin, Yu Wei *et al.*. Quasimonoenergetic proton bunch generation by dual-peaked electrostatic-field acceleration in foils irradiated by an intense linearly polarized laser[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, **105**(6): 065003
- 8 Yan Xueqing, Wu Huichun, Sheng Zhengming *et al.*. Self-organizing GeV, nanocoulomb, collimated proton beam from laser foil interaction at 7×10^{21} W/cm²[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **103**(13): 135001
- 9 Shen Lei, Chen Shaohu, Ge Xiaping *et al.*. New temporary pulse shaping technique of the front-end system in laser facility[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 84~87
沈磊, 陈绍和, 葛夏平等. 新型激光装置前端系统激光脉冲整形技术[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 84~87
- 10 Lin Honghuan, Sui Zhan, Wang Jianjun *et al.*. Optical pulse shaping by chirped pulse stacking[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 466~470
林宏奂, 隋展, 王建军等. 啁啾脉冲堆积用于光脉冲整形[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 466~470
- 11 S. Palaniyappan, R. C. Shan, R. Johnson *et al.*. Pulse shape measurements using single shot-frequency resolved optical gating for high energy (80 J) short pulse (600 fs) laser [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2010, **81**(10): 10E103
- 12 Ji Liangliang, Shen Baifei, Zhang Xiaomei *et al.*. Generating quasi-single-cycle relativistic laser pulses by laser-foil interaction [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **103**(21): 215005
- 13 V. A. Vshivkov, N. M. Naumova, F. Pegoraro *et al.*. Nonlinear electrodynamics of the interaction of ultra-intense laser pulses with a thin foil [J]. *Phys. Plasmas*, 1998, **5**(7): 2727~2741
- 14 R. Lichters, R. E. W. Pfund, J. Meyer-ter-Vehn LPIC++ [R]. Max-Planck-Institut für Quantenoptik Report No. MPQ225. Garching, Germany, 1997
- 15 V. V. Kulagin, V. A. Cherepenin, M. S. Hur *et al.*. Theoretical investigation of controlled generation of a dense attosecond relativistic electron bunch from the interaction of an ultrashort laser pulse with a nanofilm [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, **99**(12): 124801

栏目编辑: 李文喆