

文章编号: 0253-2239(2007)11-2008-5

# 稠密等离子体表面不稳定性的人射光偏振态效应\*

何民卿 盛政明 武慧春 翁苏明 董全力 张 杰

(中国科学院物理研究所光物理实验室, 北京 100080)

**摘要:** 用二维粒子模拟程序研究了相对论强激光和稠密等离子体相互作用引起的表面不稳定。数值模拟表明, 在 s 偏振光作用下, 等离子体表面出现了类瑞利-泰勒不稳定性。形成的不稳定结构随时间发展进一步深入到等离子体内部, 最终使等离子体密度形成分层泡状结构, 并向前传播。这种不稳定的产生与初始等离子体密度有密切关系, 在高于 20 倍临界密度等离子体的表面没有明显观察到这种不稳定。在 p 偏振激光作用下, 等离子体表面不能明显地形成这种结构。因此在三维几何结构下, 这种等离子体表面不稳定性将呈现各向异性。这种表面不稳定将直接影响高次谐波产生和离子加速效率。

**关键词:** 激光等离子体相互作用; 类瑞利-泰勒不稳定性; 泡状结构; 粒子模拟

中图分类号: O534 文献标识码: A

## Effect of Laser Polarizations on Surface Instability of Dense Plasma Irradiated by Relativistic Intense Laser Pulses

He Mingqing Sheng Zhengming Wu Huichun Weng Suming Dong Quanli Zhang Jie

(Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract:** The surface instability of a dense plasma slab irradiated by a relativistic intense laser pulse is investigated using two-dimensional particle-in-cell simulation. When the laser pulse is incident with s-polarization, Rayleigh-Taylor-like instability is observed on the plasma surface. Later the instability propagates into the plasma bulk forming bubble structures, which propagate forward subsequently. The development of this instability depends upon the initial plasma density. At high densities such as over 20 times of the critical density, this instability is not observed obviously. This surface instability is not formed for the case of p-polarization, i. e., the Rayleigh-Taylor-like instability is anisotropic in three-dimensional geometry. It is expected that this instability can have significant effect on high harmonics generation and ion acceleration.

**Key words:** laser-plasma interaction; Rayleigh-Taylor-like instability; bubble structure; particle-in-cell simulation

### 1 引 言

随着超短强激光技术的飞速发展和应用, 人们在相对论强激光与物质作用中观测到很多新的非线性现象<sup>[1~17]</sup>。这些研究都涉及强激光与固体靶表面的作用, 特别是激光与固体靶表面作用的稳定性是其中一个很重要的课题。有关激光等离子体中的

不稳定性研究, 非相对论激光强度下研究已经相对成熟。在较短的时间尺度下, 其中主要的电子参量不稳定性是受激拉曼散射<sup>[18,19]</sup>, 引起了等离子体中电子加热和加速。在较长的时间尺度下, 离子响应可以产生布里渊散射, 激光有质动力作用也可以形成调制和成丝不稳定, 引起等离子体密度分布发生

\* 国家自然科学基金(10335020, 10476033)、国家杰出青年基金(10425416)、国家 863 计划高技术惯性约束聚变主题和中国科学院知识创新工程项目资助课题。

作者简介: 何民卿(1979—), 女, 河北新乐人, 博士研究生, 主要从事激光等离子体相互作用等方面的研究。

E-mail: mqhe@aphy. iphy. ac. cn

导师简介: 盛政明(1966—), 男, 浙江嘉兴人, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光等离子体相互作用等方面的研究。

E-mail: zmsheng@aphy. iphy. ac. cn

收稿日期: 2007-02-02; 收到修改稿日期: 2007-04-11

明显改变。在相对论强度下,也有一些人研究了受激拉曼散射的新特点,以及相对论质量修正效应引起的不稳定性<sup>[20~22]</sup>。相对论电子效应在纵向引起相对论调制不稳定性,在横向形成相对论成丝不稳定性<sup>[23]</sup>。至今大部分的研究激光传输不稳定主要是针对低密度的等离子体,与稠密等离子体作用产生的不稳定研究相对较少。在非相对论激光强度下,Valeo 和 Estabrook<sup>[24,25]</sup>用二维粒子模拟程序发现在临界面附近产生了类瑞利-泰勒不稳定性。他们认为形成原因是质动力压力推动等离子体,使等离子体密度成不均匀的气泡结构,并且认为这种气泡结构有助于激光的吸收。在线性上升密度分布等离子体中,激光场在临界面前产生的驻波场分布,通过有质动力的作用可以形成密度调制。Wilks 等<sup>[26]</sup>在相对论光强下,在线性上升的密度截面下也得到了类似的结果。他们都认为气泡结构能够激励类瑞利-泰勒不稳定性。Macchi 等<sup>[27]</sup>的模拟中用了均匀等离子体,只看到了等离子体表面的周期性扰动,没有看到泡状结构,他们认为这是由表面双等离子体波衰变造成的。Cadjan 等<sup>[28]</sup>也通过模拟得到了类似的结果,他们认为这是由于参量衰变不稳定性形成的密度扰动。

采用二维粒子模拟程序进一步研究了初始密度均匀的等离子体表面的演化过程。在激光作用的早期也观察到了类似的气泡结构。在经过较长时间作用后,形成了分层的气泡结构,并且这个结构向等离子体内传播。在运动电子的库仑力的带动下,离子也形成类似的气泡结构。把 s 偏振和 p 偏振光情况作了对比,发现只有 s 偏振光作用下才能形成这种类瑞利-泰勒不稳定性。

## 2 s 偏振情况下不稳定性

用二维粒子程序模拟了相对论的非线性作用。程序没有考虑粒子间碰撞<sup>[18~28]</sup>。这在等离子体密度不太高 ( $100n_c$  以下),等离子体表面由于受激光加热而温度较高时基本适用。整个模拟系统参量为:  $x$  方向为  $24\lambda_0$ ,  $y$  方向为  $10\lambda_0$ 。等离子体长度在  $x$  方向为  $5\lambda_0$ ,左侧真空区域为  $8\lambda_0$ 。在  $y$  方向布满整个模拟盒,即为  $10\lambda_0$ 。在  $x$  方向采用场的吸收边界条件,在  $y$  方向采用周期边界条件。在不同模拟中,等离子体密度分别为  $2n_c, 5n_c, 10n_c$  和  $20n_c$  ( $n_c$  为临界等离子体密度),初始等离子体密度是均匀的。s 偏振激光沿  $x$  方向从左侧正入射,通过一段真空区域作用到等离子体上。强度在  $y$  方向上是

高斯分布,其半峰全宽为  $500 \mu\text{m}$ ,近似为平面波。激光脉冲包络为

$$E(t) = \begin{cases} E_0 \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{t}{10}\right), & t \leq 10\tau_0 \\ E_0, & 10\tau_0 < t \leq 210\tau_0 \\ E_0 \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{t-200}{10}\right), & 210\tau_0 < t \leq 220\tau_0 \end{cases} \quad (1)$$

这里  $\tau_0 = 2\pi/\omega_0$  是激光周期。激光强度为  $I\lambda_0^2 = (1.37 \times 10^{18} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^2)a_0^2$ , 这里取  $a_0 = eE_0/m_e\omega_0c = 2$ , 足以引起强的相对论电子振荡。电子初始温度为  $50 \text{ eV}$ ,离子初始温度为  $5 \text{ eV}$ ,离子是运动的。电子与离子的质量比为  $1/1836$ 。

以  $2n_c$  为例研究等离子体密度随时间的演变过程。激光和等离子体相互作用早期,大约在  $t=20\tau_0$  的时候,电子密度沿  $y$  方向呈周期性扰动,如图 1(a)。随后扰动的“波峰”慢慢增长,在  $t=45\tau_0$  时在等离子体形成多个密度尖峰,如图 1(b)所示。这些尖峰沿  $y$  方向向两侧膨胀,和相邻的尖峰膨胀出来的电子慢慢融合,在  $t=50\tau_0$  形成气泡结构。在  $t=70\tau_0$  时形成多层气泡结构, $t=80\tau_0$  时的气泡结构已经非常明显,有如波纹一样的层状结构向后展开,如图 1(c)所示。随着时间的推移,气泡层会越来越多,如图 1(d)所示。

离子密度的演化过程类似于电子。在  $t=30\tau_0$  时沿  $y$  方向出现周期性扰动,这比电子出现的晚 10 个光周期。在  $t=50\tau_0$  时出现密度“尖峰”结构,比电子出现的晚 5 个光周期。大约在  $t=70\tau_0$  时部分出现了泡状结构,如图 2 所示。与电子形成的气泡结构不同,它有一个长长的拖尾,并且没有形成多层的气泡结构。这是因为离子的运动是由电子运动形成的库仑场带动的,由于离子质量较大,惯性大,所以它的加速要比电子延迟且相对较弱。

当等离子体密度为  $5n_c$  和  $10n_c$  时也能看到类似的演化过程。图 3 给出密度为  $5n_c$ ,在  $t=100\tau_0$  时刻电子和离子的密度分布。电子和离子都有很明显的泡状结构。密度越高,电子和离子密度出现泡状结构会越晚,演化过程越慢。在我们的模拟中,在等离子体内部还观测到了类似于激波的结构。这个结构以一定的速度向前传播,并呈电荷准中性。

为了更清楚地比较不同等离子体密度下出现泡状结构的快慢,在表 1 和表 2 给出不同等离子体密度下其电子和离子出现气泡所需要的时间。

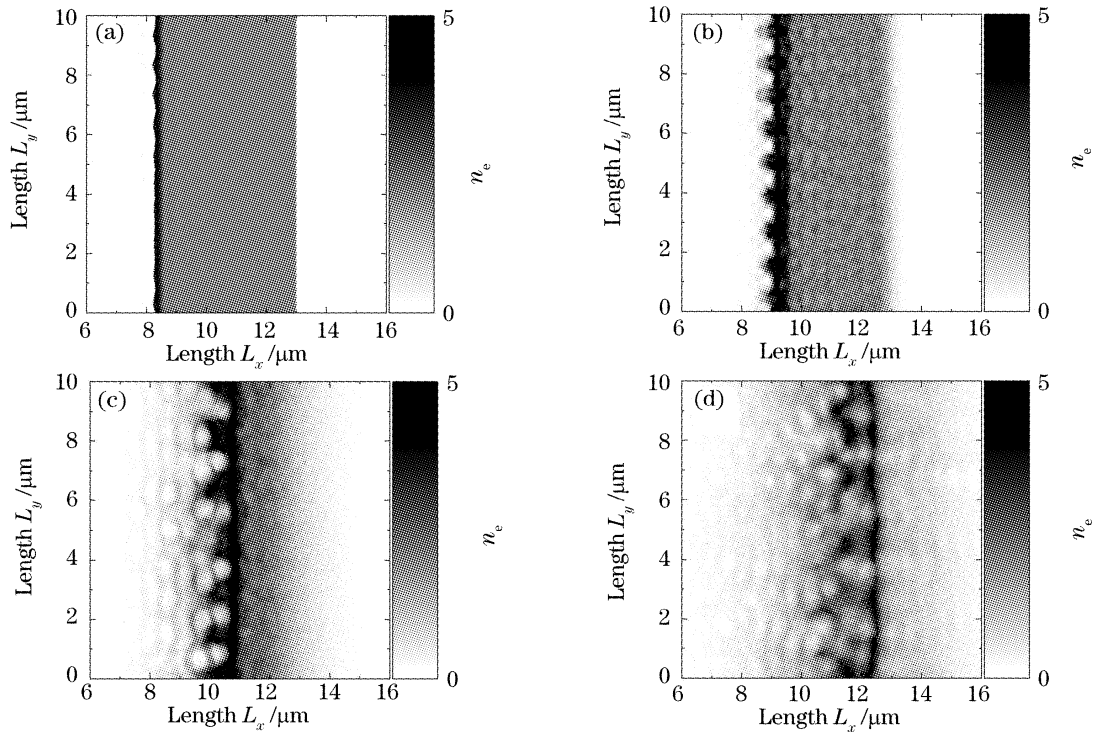


图 1 初始等离子体密度为  $n=2n_c$  时在  $xy$  坐标空间的电子密度。(a)  $t=20\tau_0$ , (b)  $t=45\tau_0$ , (c)  $t=80\tau_0$ , (d)  $t=110\tau_0$   
 Fig. 1 Snapshots of the electron density distribution in the  $x-y$  space for the time (a)  $t=20\tau_0$ , (b)  $t=45\tau_0$ ,  
 (c)  $t=80\tau_0$  and (d)  $t=110\tau_0$ . The initial plasma density is  $n=2n_c$

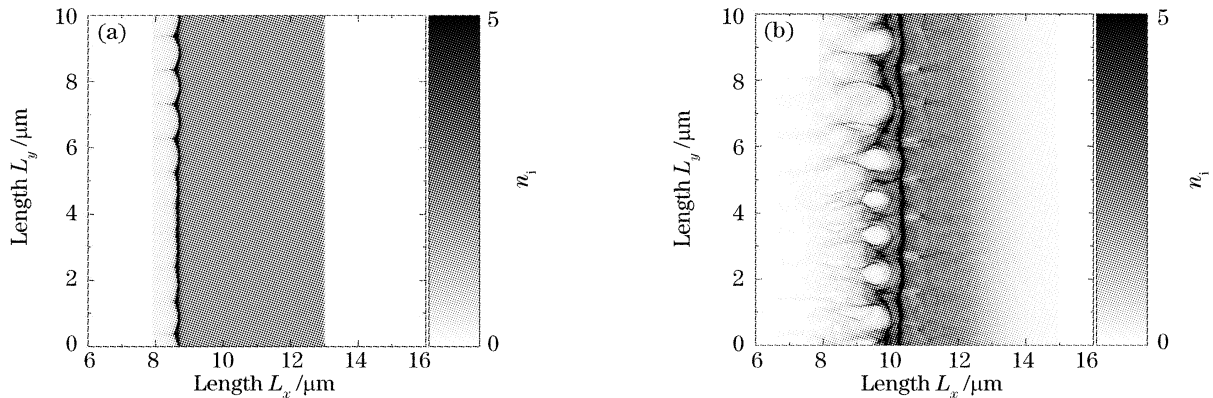


图 2 初始等离子体密度为  $n=2n_c$  时  $xy$  坐标空间的离子密度。(a)  $t=30\tau_0$ , (b)  $t=70\tau_0$   
 Fig. 2 Snapshots of the ion density distribution in the  $x-y$  space at  $t=30\tau_0$  (a) and  $t=70\tau_0$  (b).  
 The initial plasma density is  $n=2n_c$

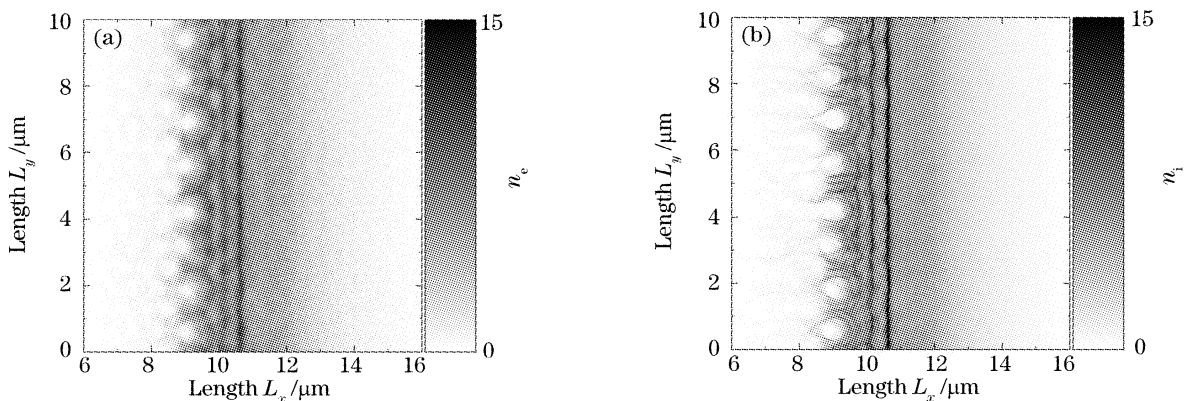


图 3 初始等离子体密度为  $n=5n_c$ ,  $t=100\tau_0$  时  $xy$  坐标空间的 (a) 电子密度, (b) 离子密度  
 Fig. 3 Snapshots of the distributions of electron density (a) and ion density (b) in the  $x-y$  space at  $t=100\tau_0$ .  
 The initial plasma density is  $n=5n_c$

表 1 电子密度演化

Table 1 Evolution of electron density

	Time forming initial perturbation	Time forming bubble structure
$n_0 = 2n_c$	$t = 20\tau_0$	$t = 50\tau_0$
$n_0 = 5n_c$	$t = 30\tau_0$	$t = 70\tau_0$
$n_0 = 10n_c$	$t = 50\tau_0$	$t = 120\tau_0$

表 2 离子密度演化

Table 2 Evolution of ion density

	Time forming initial perturbation	Time forming bubble structure
$n_0 = 2n_c$	$t = 30\tau_0$	$t = 70\tau_0$
$n_0 = 5n_c$	$t = 35\tau_0$	$t = 90\tau_0$
$n_0 = 10n_c$	$t = 60\tau_0$	$t = 130\tau_0$

从表中可以发现,随密度的增大形成不稳定性所需要经历的时间也明显增大。并且当等离子体密

度为  $20n_c$  时,只能在  $y$  方向上形成很小的周期性扰动,和低密度等离子体早期出现的现象类似,但不能继续发展成气泡结构。

### 3 p 偏振情况下等离子体随激光的发展

入射激光为 p 偏振时模拟了等离子体密度为  $2n_c$  和  $5n_c$  两种情况,其他条件和 s 偏振情况下的一样,同样以  $2n_c$  为例。激光和等离子体相互作用早期,在等离子体表面形成了不规则的扰动,如图 4(a) 所示。但是这种扰动并没有随着时间演变成类瑞利-泰勒不稳定性,并向等离子体内部发展,而是随着激光继续和等离子体相互作用,这种扰动慢慢消失,如图 4(b) 所示。离子的密度也只是在最初时形成微小的扰动,如图 4(c),而没有随时间演变成类瑞利-泰勒不稳定性,如图 4(d) 所示。 $5n_c$  时得到的现象和  $2n_c$  时的现象完全类似,这里不再赘述。

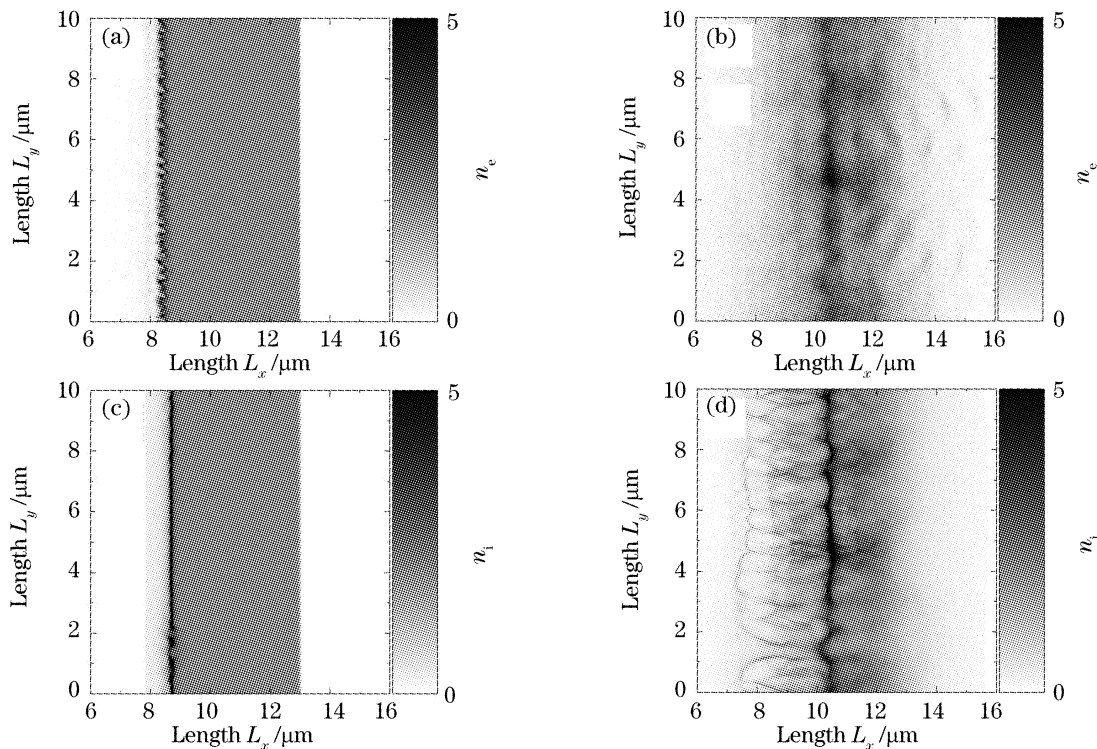


图 4 初始等离子体密度为  $n=2n_c$  时的  $xy$  坐标空间的电子和离子密度。(a)  $t=20\tau_0$  时的电子密度,(b)  $t=70\tau_0$  时的电子密度,(c)  $t=30\tau_0$  时的离子密度,(d)  $t=70\tau_0$  时的离子密度

Fig. 4 Snapshots of electron and the ion density in the  $x$ - $y$  space. (a) Electron density at  $t=20\tau_0$ , (b) electron density at  $t=70\tau_0$ , (c) ion density at  $t=30\tau_0$ , (d) ion density at  $t=70\tau_0$ . The initial plasma density is  $n=2n_c$ .

上述模拟结果表明,这种类瑞利-泰勒不稳定性发展具有各向异性,在垂直激光偏振方向,不稳定能够发展起来,而在激光偏振方向不能发展。这与激光在近临界密度等离子体中传播时,其成丝和自聚焦不稳定呈现的各向异性类似<sup>[25]</sup>。在激光偏振方向,由于产生密度扰动,由此诱导出一个与激光振动频率一

样的静电场分量,这个场倾向于阻止扰动的进一步发展。本文给出的数值模拟表明,不稳定的增长率与等离子体初始密度成反比,而文献[9]给出的增长率与等离子体密度成正比,其理论模型只适用于低于临界等离子体密度的情况,而本文的数值模拟采用的密度是高于临界密度的。因此,为了解释本文的数值模

拟,还有待发展新的理论模型。

上述数值模拟给出的表面不稳定发展对高能电子和离子产生会有很大的影响。首先,表面不稳定的发展,直接影响入射光的波阵面,由此影响激光的吸收,以及高能电子和高能离子的产生效率。其次,表面结构的形成也将影响产生高能电子的发射方向。表面不稳定对固体靶表面高次谐波的产生也有很大的影响,直接影响高次谐波的发射方向和产生效率。因为高次谐波的产生与靶表面等离子体密度标长有密切的关系。这将是今后需要深入讨论的课题。

## 4 结 论

相对论激光和高密度等离子体相互作用下类瑞利-泰勒不稳定性只发生在 s 偏振情况下, p 偏振不能使类瑞利-泰勒不稳定性发展起来。在 s 偏振情况下,不稳定性的发展速度随着密度增加而下降,并且达到一定密度后就不再形成气泡状结构。而 p 偏振情况下,只在最初的时候可以看出有不规则的密度扰动,随后这种扰动就消失了。说明类瑞利-泰勒不稳定性只在 s 偏振下能够发展起来, p 偏振下不能发展起来。这种不稳定的发展对激光在等离子体中的吸收、高能粒子的产生、高次谐波的产生都有重要影响。

## 参 考 文 献

- 1 M. H. Key, M. D. Cable, T. E. Cowan *et al.*. Hot electron production and heating by hot electrons in fast ignitor research [J]. *Phys. Plasmas*, 1988, **5**(5): 1966~1972
- 2 Y. T. Li, X. H. Yuan, M. H. Xu *et al.*. Observation of a fast electron beam emitted along the surface of a target irradiated by intense femtosecond laser pulses[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **96**:165003-1~165003-4
- 3 Y. T. Li, J. Zhang, Z. M. Sheng *et al.*. High-energy electrons produced in subpicosecond laser-plasma interactions from subrelativistic laser intensities to relativistic intensities[J]. *Phys. Rev. E*, 2004, **69**: 036405-1~036405-7
- 4 L. M. Chen, J. Zhang, Y. T. Li *et al.*. Effects of laser polarization on jet emission of fast electrons in ultrashort pulse laser-plasmas[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **87**(22): 225001-1~225001-4
- 5 Song Xiangyang, Han Shensheng, Xu Zhizhan. Monte Carlo simulation of superthermal electron transport process in laser-plasma interaction[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(3): 316~320 (in Chinese)  
宋向阳, 韩申生. 徐至展. 激光等离子体相互作用中超热电子输运过程的蒙特卡罗模拟[J]. *光学学报*, 1996, **16**(3): 316~320
- 6 M. Roth, T. E. Cowan, M. H. Key *et al.*. Fast Ignition by intense laser-accelerated proton beams[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **86**(3): 436~439
- 7 E. L. Clark, K. Krushelnick, M. Zepf *et al.*. Energetic heavy-ion and proton generation from ultraintense laser-plasma interactions with solids[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(8): 1654~1657
- 8 A. Maksimchuk, S. Gu, K. Flippo *et al.*. Forward ion

- acceleration in thin films driven by a high-intensity laser [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(18): 4108~4111
- 9 H. Schworer, S. Pfotenhauer, O. Jäckel *et al.*. Laser-plasma acceleration of quasi-monoenergetic protons from microstructured targets[J]. *Nature*, 2006, **439**(7075): 445~448
  - 10 B. M. Hegelich, B. J. Albright, J. Cobble *et al.*. Laser acceleration of quasi-monoenergetic MeV ion beams[J]. *Nature*, 2006, **439**(7075): 441~444
  - 11 Paul Gibbon. Harmonic generation by femtosecond laser-solid interaction; A coherent water-window light source? [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **76**(1): 50~53
  - 12 R. Lichters, J. Meyer-ter-Vehn, A. Pukhov. Short-pulse laser harmonics from oscillating plasma surfaces driven at relativistic intensity[J]. *Phys. Plasmas*, 1996, **3**(9): 3425~3437
  - 13 P. A. Norreys, M. Zepf, S. Moustazis *et al.*. Efficient extreme UV harmonics generated from picosecond laser pulse interactions with solid targets[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **76**(11): 1832~1835
  - 14 M. Zepf, G. D. Tsakiris, G. Pretzler *et al.*. Role of the plasma scalelength in the harmonic generation from solid targets[J]. *Phys. Rev. E*, 1998, **58**(5): R5253~R5256
  - 15 B. Dromey, M. Zepf, A. Gopal *et al.*. High harmonic generation in the relativistic limit [J]. *Nature Phys.*, 2006, **2**(7): 456~459
  - 16 Tang Yuhui, Han Shensheng, Zhang Changxue *et al.*. Second harmonic emission from fs laser and underdense plasma interaction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7): 780~783 (in Chinese)  
汤宇晖, 韩申生, 张长学等. 飞秒强激光与欠稠密等离子体相互作用中的二次谐波辐射[J]. *光学学报*, 2002, **22**(7): 780~783
  - 17 Yu Wei, Xu Yuan, Shen Baifei *et al.*. High order harmonics induced by resonance absorption in laser produced plasmas[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(5): 601~604 (in Chinese)  
余 玮, 徐 远, 沈百飞等. 激光等离子体中由共振吸收诱发的高次谐波[J]. *光学学报*, 1996, **16**(5): 601~604
  - 18 J. F. Drake, P. K. Kaw, Y. C. Lee *et al.*. Parametric instabilities of electromagnetic waves in plasmas [J]. *Phys. Fluids*, 1974, **17**(4): 778~785
  - 19 A. Bruce Langdon, Barbara F. Lasinski, William L. Kruer. Nonlinear saturation and recurrence of the two-plasmon decay instability[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1979, **43**(2): 133~136
  - 20 Z. M. Sheng, K. Mima, Y. Sentoku *et al.*. Parametric instabilities of intense lasers from interaction with relativistic hot plasmas[J]. *Phys. Rev. E*, 2000, **61**(4): 4362~4369
  - 21 S. Guérin, G. Laval, P. Mora *et al.*. Modulational and Raman instabilities in the relativistic regime[J]. *Phys. Plasmas*, 1995, **2**(7): 2807~2814
  - 22 C. J. McKinstrie, R. Bingham. Stimulated Raman forward scattering and the relativistic modulational instability of light waves in rarefied plasma [J]. *Phys. Fluids B*, 1992, **4**(8): 2626~2633
  - 23 Z. M. Sheng, K. Nishihara, T. Honda *et al.*. Anisotropic filamentation instability of intense laser beams in plasmas near the critical density[J]. *Phys. Rev. E*, 2001, **64**(6): 066409-1~066409-9
  - 24 Kent Estabrook. Critical surface bubbles and corrugations and their implications to laser fusion [J]. *Phys. Fluids*, 1976, **19**(11): 1733~1739
  - 25 E. J. Valeo, K. G. Estabrook. Stability of the critical surface in irradiated plasma[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1975, **34**(16): 1008
  - 26 S. C. Wilks, W. L. Kruer, M. Tabak *et al.*. Absorption of ultra-intense laser pulses[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **69**(9): 1383~1386
  - 27 A. Macchi, F. Cornolti, F. Pegoraro *et al.*. Surface oscillations in overdense plasmas irradiated by ultrashort laser pulses[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **87**(20): 205004-1~205004-4
  - 28 M. G. Cadjan, M. F. Ivanov, A. V. Ivlev. Kinetic processes in the overdense plasma under the action of ultra-intense laser pulses [J]. *Laser Part. Beams*, 1996, **15**(1): 33~44