

## Compton 散射下等离子体初温对质子产生的影响

文桦<sup>1</sup> 郝晓飞<sup>2</sup> 郝东山<sup>2\*</sup><sup>1</sup>黄淮学院电子科学与工程系, 河南 驻马店 463000  
<sup>2</sup>黄淮学院信息工程学院, 河南 驻马店 463000

**摘要** 应用多光子非线性 Compton 散射模型和二维 particle-in-cell(PIC)粒子模拟程序,研究了 Compton 散射下等离子体初始温度对质子产生的影响,并进行了数值模拟。结果表明:与 Compton 散射前相比,随着等离子体初始温度的增加,产生的质子数有更显著的增加,靶前和靶后质子能谱曲线趋于平滑,加速质子数量的差别减小。当入射激光强度增强时,随着等离子体初始温度的增加,质子增加的相对幅度有明显减小。当入射激光强度减弱时,随着等离子体初始温度的增加,质子能谱曲线仍有清晰的区别,质子数量和速度都有明显的增加。

**关键词** 非线性光学;等离子体;质子加速;二维 Particle-in-cell 粒子模拟程序;多光子非线性 Compton 散射

**中图分类号** O539 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.081902

## Influence of Initial Plasma Temperature on Proton Generation under Compton Scattering

Wen Hua<sup>1</sup> Hao Xiaofei<sup>2</sup> Hao Dongshan<sup>2</sup><sup>1</sup>Department of Electron Science and Engineering, Huanghuai University,  
Zhumadian, Henan 463000, China<sup>2</sup>Department of Information Engineering, Huanghuai University, Zhumadian, Henan 463000, China

**Abstract** The influence of initial plasma temperature on the proton generation under Compton scattering is studied by using the model of multi-photon nonlinear Compton scattering and two-dimensional particle-in-cell (PIC) simulation, and the results are numerically simulated. The results show that the amounts of produced proton have an even noteworthy increase along with the increase of the initial plasma temperature than that before the Compton scattering, the energy spectrum curves of the protons before and after the target tend to be smooth, and the differences in the number of accelerated protons are decreased. When the incident laser intensity is increased, the relative extents of the proton number increasing are clearly decreased along with the increase of the initial plasma temperature. When the incident laser intensity is decreased, the energy spectrum curves of the protons still have clear differences with the increase of the initial plasma temperature, and the number and speed of protons are clearly increased.

**Key words** plasma; proton acceleration; two-dimensional particle-in-cell simulation; multi-photon nonlinear Compton scattering

**OCIS codes** 190.3970; 190.5890

## 1 引言

利用啁啾脉冲技术<sup>[1]</sup>获得  $10^{21}$  W/cm<sup>2</sup> 量级以上强激光已成为现实。利用这种超强超短激光与等离子体作用产生的高能质子具有能量高、束流强度大、脉宽窄、方向性好、转换效率高等特点,且在核聚变快点火、癌症治疗和激光除锈等方面具有重要应用,因此引起了人们的高度关注和深入研究<sup>[2~5]</sup>。人们曾提出获得质子的不同机制,如 Wilks 等<sup>[6~8]</sup>提出靶背法向鞘层加速质子机制;Wei 等<sup>[9~11]</sup>提出靶前静电激波加速质子

收稿日期: 2012-03-28; 收到修改稿日期: 2012-05-06; 网络出版日期: 2012-06-07

基金项目: 河南省基础与前沿技术研究项目(092300410227)资助课题。

作者简介: 文桦(1969—),女,硕士,副教授,主要从事信号传输方面的研究。E-mail: wenhua6906@126.com

\* 通信联系人。E-mail: haodongshan1948@126.com

机制;Roth 等<sup>[12]</sup>利用激光与固体靶相互作用加速质子;张家泰等<sup>[13]</sup>提出“快点火”加速质子机制;Zepf 等<sup>[14]</sup>给出了静电激波加速质子的能谱。Esirkepov 等<sup>[15]</sup>指出,激光强度、等离子体初始温度<sup>[16,17]</sup>及前表面密度标长<sup>[18]</sup>对质子能谱和产额有影响。近期,洪蕾等<sup>[19,20]</sup>指出,入射激光功率对等离子体光声信号和发射光谱都有一定的影响。陶邦一等<sup>[21]</sup>建立了可用于模拟水体非弹性散射过程的数值模型。应指出的是,在以上等离子体初温对质子产生影响的研究中,并未考虑 Compton 散射。实验表明,光强度为  $10^{16}$  W/cm<sup>2</sup> 量级以上时,非线性 Compton 效应开始显现<sup>[22]</sup>,可见,Compton 散射对质子加速的影响是不能忽略的。本文针对该问题进行了研究,通过数值模拟得出了 Compton 散射对质子能谱曲线及产生的质子数量和速度的影响。

## 2 理论分析

当激光频率和强度满足一定条件时,一个电子可同时与多个光子作用并放出一个高频光子,这就是多光子非线性 Compton 散射模型。

等离子体中非线性 Compton 散射频率为<sup>[23]</sup>

$$\omega_s = \frac{N\omega(1 + \beta\cos\theta)(1 - \beta_f\cos\theta'_1)}{\eta^2 + \frac{\eta N\hbar\omega}{m_0c^2} \frac{(1 + \beta\cos\theta)}{(1 - \cos\theta')^{-1}}}, \quad (1)$$

式中  $\eta = |\gamma - \gamma_f|/(\gamma - 1)$  是量度散射非弹性的参量; $\gamma_{(f)} = [1 - (v_{(f)}/c)^2]^{-1/2} = (1 - \beta_{(f)}^2)^{-1/2}$  和  $v_{(f)}$ 、 $N$ 、 $m_0$ 、 $\omega$ 、 $c$ 、 $h = 2\pi\hbar$ 、 $\theta$ 、 $\theta'_1$  和  $\theta'$  分别为电子散射前后洛仑兹因子和速度、与电子同时作用光子数、电子静止质量、入射光频率、真空的光速、普朗克常数、散射前电子和光子运动方向夹角、电子静止系中电子与散射光子运动方向夹角以及光子散射角。若取耦合光频为  $\omega_c = \omega_s - \omega$  形式,则有

$$\omega_c = \omega \left[ \frac{N(1 + \beta\cos\theta)(1 - \beta_f\cos\theta'_1)}{\eta^2 + \frac{\eta N\hbar\omega}{m_0c^2} \frac{(1 + \beta\cos\theta)}{(1 - \cos\theta')^{-1}}} - 1 \right]. \quad (2)$$

耦合光与等离子体作用,光预脉冲先将靶电离,在靶前表面形成的等离子体迅速向真空膨胀,形成高温、低密度等离子体。等离子体再与耦合主脉冲作用,在靶前表面产生大量的超热电子通过输运,再与靶背表面其他原子碰撞而使其电离,在靶与真空交界面的 Debye 鞘层中形成很强的静电场。静电场在极短时间内使加速质子沿靶背法线方向射出。耦合光的电场和磁场强度、功率密度分别为<sup>[17]</sup>

$$E_c = \frac{2\pi m_0 c^2 a_c}{e\lambda_c} \approx 3.21 \times 10^{12} \frac{a_c [\text{V/m}]}{\lambda_c [\mu\text{m}]}, \quad (3)$$

$$B_c = \frac{2\pi m_0 c}{e\lambda_c} a_c = 1.07 \times 10^7 \frac{a_c [\text{T}]}{\lambda_c [\mu\text{m}]}, \quad (4)$$

$$I_c = \frac{2\pi^2 m_0^2}{e^2 c^{-3} \epsilon_0^{-1}} \frac{a_c^2}{\lambda_c^2} = \frac{a_c^2}{\lambda_c^2} \times 1.37 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2, \quad (5)$$

式中  $a_c = eE_c/\omega_c m_0 c \approx e(E + \Delta E)/\omega m_0 c$  和  $\lambda_c$ 、 $E$  和  $\Delta E$ 、 $e$  分别为耦合光的归一化强度和波长、入射光的电场强度及其增量、电子电量。若入射光波长和功率密度、耦合光波长分别为  $1 \mu\text{m}$  和  $10^{18}$  W/cm<sup>2</sup>、 $0.9 \mu\text{m}$ ,则耦合光的电场强度为  $2.97$  TV/m,较散射前的电场强度  $2.7$  TV/m 增加了  $0.27$  TV/m。可见,耦合电场作用下的超热电子能使等离子体表面的原子电离形成强大的静电场。此时电子振荡速度接近光速,相对论效应和非线性效应应该考虑。

Debye 鞘层中的电场满足连续性方程

$$\frac{\partial n_{ci}}{\partial t} + \frac{\partial(n_{ci}v_{ci})}{\partial x} = 0, \quad (6)$$

式中  $n_{ci} = n_i + \Delta n_i$  和  $v_{ci} = v_i + \Delta v_i$ 、 $n_i$  和  $v_i$  及  $\Delta n_i$  和  $\Delta v_i$  分别是质子耦合密度和速度、散射前质子密度和速度及其增量。(6)式中, $n_{ci}$ 可表示为

$$n_{ci} = n_0 \exp\left(-\frac{x}{C_{cs}t} - 1\right), \quad (7)$$

式中  $C_{cs} = \sqrt{Zk_B T_c/m_i}$ 、 $Z$ 、 $k_B$ 、 $T_c = T + \Delta T$ 、 $m_i$ 、 $T$  和  $\Delta T$  分别为粒子电荷态、Boltzmann 常数、等离子体耦合

温度、质子质量、散射前等离子体温度及其增量;  $n_0$  为等离子体初始密度。由(6),(7)式可得质子耦合速度和运动方程分别为

$$v_{ci} = C_{cs} + x/t, \quad (8)$$

$$\frac{\partial v_{ci}}{\partial t} + v_{ci} \frac{\partial v_{ci}}{\partial x} = \frac{eE_{cb}}{m_i}. \quad (9)$$

由(8),(9)式可得加速质子耦合静电场强为

$$E_{cb} = \frac{m_i C_{cs}}{et} = \frac{\epsilon_{ci}}{eC_{cs}t} = \frac{k_B T_{chot}}{e\lambda_D} = \frac{k_B T_{chot}}{el_0}, \quad (10)$$

式中  $\epsilon_{ci} = [\sqrt{1 + I_{cl}\lambda_{cd}^2/1.37} - 1]$  (eV)、 $T_{chot}$ 、 $I_{cl}$ 、 $l_0$  分别为质子耦合动能、超热电子温度、激光功率密度、等离子体密度标长;  $\lambda_{cd}$  为耦合 Debye 长度, 表示靶前后表面加速范围, 可用等离子体密度标长代替, 且由  $\lambda_{cd} = (\epsilon_0 k_B T_{chot}/n_{chot} e^2)^{1/2}$  决定;  $\lambda_D$  为 Debye 波长。

采用 Particle-in-cell(PIC)方法计算粒子运动。给出粒子初始位置和速度, 用平均近似法求得各处电荷和电流密度分布, 再通过求解 Maxwell 方程组

$$\nabla \cdot \mathbf{E}_c = 4\pi\rho_c, \quad \nabla \cdot \mathbf{B}_c = 0, \quad (11)$$

$$c\nabla \times \mathbf{E}_c = -\frac{\partial \mathbf{B}_c}{\partial t}, \quad c\nabla \times \mathbf{B}_c = 4\pi\mathbf{J}_c + \frac{\partial \mathbf{E}_c}{\partial t}, \quad (12)$$

求出各处的电场和磁场强度及每个粒子所受的力, 并由牛顿运动方程和相对论运动方程

$$\frac{\partial \mathbf{p}_c}{\partial t} = q[\mathbf{E}_c + \mathbf{v}_c/c \times \mathbf{B}_c], \quad \mathbf{p}_c = \gamma_c m \mathbf{v}_c, \quad (13)$$

$$\gamma = \left(1 - \frac{v_c^2}{c^2}\right)^{-1/2}, \quad (14)$$

求出下一时刻粒子速度。  $\rho_c$ 、 $\mathbf{J}_c$ 、 $\mathbf{p}_c$ 、 $\mathbf{v}_c$ 、 $\gamma_c$ 、 $q$  和  $m$  分别为粒子耦合密度、电流密度、动量、质子速度、相对论因子、电量和质量,  $\mathbf{E}_c$  和  $\mathbf{B}_c$  分别表示耦合电场和磁场。通过对大量粒子运动的数值跟踪, 可知等离子体集体行为。

### 3 数值模拟

令波长  $\lambda = 1 \mu\text{m}$ 、沿  $Y$  方向偏振的线偏振光沿  $X$  方向正入射到固体靶上, 其周期为  $T_p$ , 上升沿为  $2T_p$ , 然后为平顶, 持续时间为  $18T_p$ , 光焦半径为  $2\lambda$ 。靶大小为  $5\lambda \times 10\lambda$ , 位于  $X$  和  $Y$  方向的区间分别为  $10\lambda \sim 15\lambda$  和  $5\lambda \sim 10\lambda$ , 靶中有完全电离的质子和电子, 初温  $T_e = T_i = 0.1, 1, 5 \text{ keV}$ 。最高电子密度  $n_e = 4n_c$ ,  $n_c = 1.12 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$  为均匀等离子体临界密度。采用二维 PIC 粒子模拟程序<sup>[18]</sup>, 模拟区域为  $60\lambda \times 20\lambda$ , 系统粒子数为  $10^9$ 。

取入射激光峰值  $I_0 = 1.38 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$ , 其归一化振幅  $a \equiv eA/m_e c^2 = 10$ , 入射光经  $27T_p$  后的质子能谱图和相空间分布图如图 1 和图 2 所示, 其中相空间曲线由左至右分别表示靶前、靶位和靶后的情况。由图 1

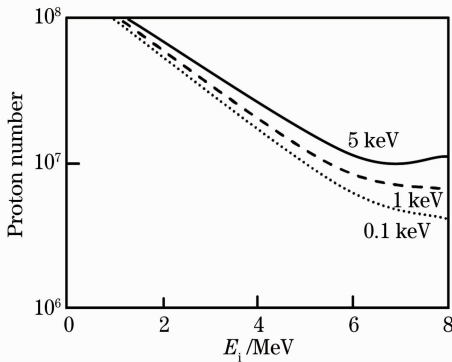


图 1 不同温度下质子能谱图

Fig. 1 Proton energy spectra under different initial plasma temperatures

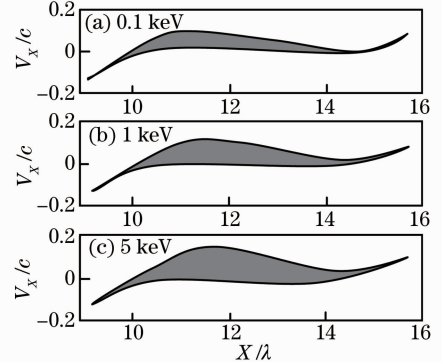


图 2 不同温度下质子相空间分布图

Fig. 2 Phase space ( $X, V_x$ ) of protons under different initial plasma temperatures

可知,与散射前相比,对应  $T_i=0.1, 1, 5$  keV, 散射前最低能量和最高能量的质子数分别分布在  $10^7 \sim 10^8$  和  $10^5$  上方至  $10^6$  上方之间<sup>[18]</sup>, 而散射后则分别分布在  $10^8$  和  $10^7$  附近, 靶前后质子能谱曲线趋于平滑。可见, 质子数增加更显著, 随着等离子体初温增加, 加速质子数量差别减小。由图 2 可知, 与散射前的曲线相比, 对应  $T_i=0.1, 1, 5$  keV, 散射前由靶前静电激波加速产生的高能质子的最大速度(约为  $0.2c$ )是靶后加速高能质子最大速度(约为  $0.1c$ )的 2 倍, 而散射使靶前加速质子获得的最大速度约为  $0.15c$ , 靶后加速质子获得的最大速度约为  $0.29c$ , 是靶前的 1.9 倍。这主要是由于散射使等离子体温度升高, 离子声速增大, 马赫数减小, 激波加速产生高能质子的时间缩短, 靶前向靶后输运电子速度加快, 在后表面形成更强的准静电场, 使激波和法向鞘层加速机制增强。

$I_0=3.1 \times 10^{20}$  W/cm<sup>2</sup> 时, 质子能谱和相空间分布如图 3 所示。由图 3 可知, 与  $I_0=1.38 \times 10^{20}$  W/cm<sup>2</sup> 时相比, 随着温度的增加, 质子增加的相对幅度明显减小。这主要是由于耦合光对质子沿入射光方向的加速使质子与电子的复合几率增大, 从而降低了激波场强的缘故。

$I_0=5 \times 10^{19}$  W/cm<sup>2</sup> 时, 入射光经  $30T_p$  时质子能谱和相空间分布如图 4 所示。由图可知, 不同温度下质子能谱仍有清晰区别, 随着温度的增加, 质子数和速度明显增加。这主要是由于散射使耦合光强增大,  $0.1$  keV 和  $1$  keV 下仍能产生激波的缘故。

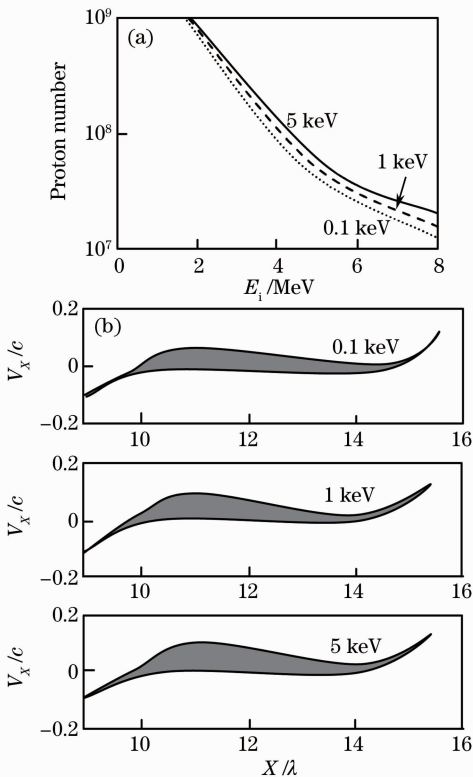


图 3  $I_0=3.1 \times 10^{20}$  W/cm<sup>2</sup> 时质子(a)能谱图和 (b)相空间分布图

Fig. 3 (a) Proton energy spectrum and (b) phase space ( $X, V_x$ ) of protons under different initial plasma temperatures with the laser intensity of  $I_0=3.1 \times 10^{20}$  W/cm<sup>2</sup>

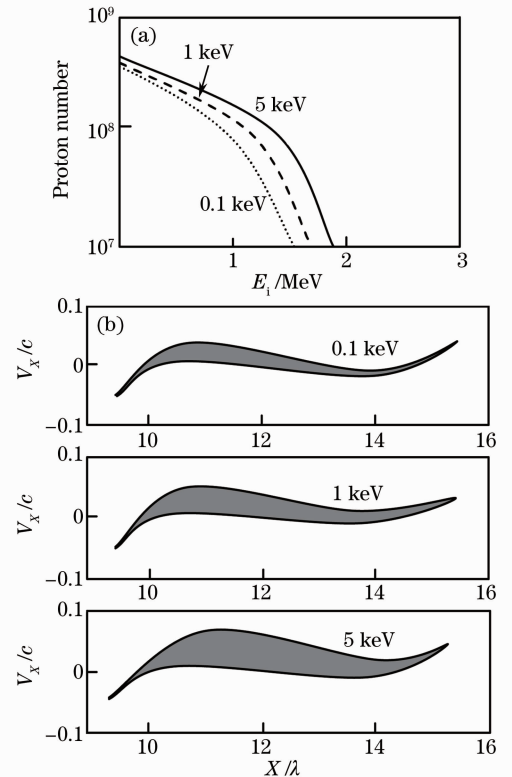


图 4  $I_0=5 \times 10^{19}$  W/cm<sup>2</sup> 时质子(a)能谱图和 (b)相空间分布图

Fig. 4 (a) Proton energy spectrum and (b) phase space ( $X, V_x$ ) of protons under different initial plasma temperatures with the laser intensity of  $I_0=5 \times 10^{19}$  W/cm<sup>2</sup>

## 4 结 论

1) 与散射前相比, 随着等离子体初始温度增加, 质子数增加更显著, 靶前和靶后质子能谱曲线趋于平滑, 加速质子数的差别减小。这主要是由于散射使等离子体温度升高, 离子声速增大, 马赫数减小, 激波形成时间缩短, 靶前向靶后输运电子的速度加快, 在靶后表面形成的准静电场更强, 从而使激波和靶背法向鞘层

加速机制的增强。

2) 入射光强增强时,随着等离子体初始温度增加,质子增加的相对幅度有明显减小。这主要是由于耦合激光使质子沿入射光方向的加速增大了质子与电子的复合几率,降低了静电激波场强的缘故。

3) 入射光强减弱时,随着温度的增加,质子能谱曲线仍有清晰区别,质子数量和速度都有明显的增加。这主要是由于散射使耦合光强度增大,即使在 0.1 keV 和 1 keV 下仍能产生激波的缘故。

### 参 考 文 献

- 1 J. A. Cobble, R. P. Johnson, T. E. Cowan *et al.*. High resolution laser-driven proton radiography[J]. *J. Appl. Phys.*, 2002, **92**(2): 1775~1779
- 2 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
- 3 T. Okada, Y. Mikado, T. Kitadta *et al.*. Fast ion bunch generation by ultraintense laser pulse on plasma foil target[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2005, **44**(3): 1431~1435
- 4 A. A. Andreev, K. Yu. Platonov, T. Okada *et al.*. Nonlinear absorption of short intense laser pulse in a nonuniform plasma[J]. *Phys. Plasmas*, 2003, **10**(1): 220~226
- 5 Tong Yanqun, Zhang Yongkang, Yao Hongbing *et al.*. Real-time monitoring system for laser derusting based on plasma intensity[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1003009  
佟艳群, 张永康, 姚红兵 等. 基于等离子体光强信号的激光除锈实时监测系统[J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1003009
- 6 S. C. Wilks, A. B. Langdon, T. E. Cowan *et al.*. Energetic proton generation in ultra-intense laser-solid interactions[J]. *Phys. Plasmas*, 2001, **8**(2): 542~549
- 7 S. Betti, F. Ceccherini, F. Cornolti *et al.*. Expansion of a finite-size plasma in vacuum[J]. *Plasma Phys. Control Fusion*, 2005, **47**(3): 521~529
- 8 P. Mora. Plasma expansion into a vacuum[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(18): 185002
- 9 M. S. Wei, S. P. D. Mangles, Z. Najmudin *et al.*. Ion acceleration by collisionless shocks in high-intensity laser-underdense-plasma interaction[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**(15): 155003
- 10 E. D. Humieres, E. Lefebvre, L. Gremillet *et al.*. Proton acceleration mechanisms in high-intensity laser interaction with thin foils[J]. *Phys Plasmas*, 2005, **12**(6): 062704
- 11 O. Silva Luis, M. Marti, J. D. Davies *et al.*. Proton shock acceleration in laser-plasma interactions[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(1): 015002
- 12 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
- 13 Zhang Jiatai, He Bin, He Xiantu *et al.*. Study on the mechanism of the fast ignition in laser fusion[J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, **20**(5): 919~925  
张家泰, 何斌, 贺贤士 等. 激光聚变快点 K 机理研究[J]. *物理学报*, 2001, **86**(3): 436~439
- 14 M. Zepf, E. L. Clark, F. N. Heg *et al.*. Proton acceleration from high-intensity laser with thin foil targets[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(6): 064801
- 15 T. Esirkepov, M. Borghesi, S. Y. Bulanov *et al.*. Highly efficient relativistic-ion generation in the laser-piston regime[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(17): 175003
- 16 X. M. Zhang, B. F. Shen, M. Y. Yu *et al.*. Effect of plasma temperature on electrostatic shock generation and ion acceleration by lasers[J]. *Phys. Plasmas*, 2007, **14**(11): 113108
- 17 Bin Jianhui, Lei Anle, Yu Wei. Influence of initial plasma temperature on energetic proton generation from laser-plasma interaction[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1416~1419  
宾建辉, 雷安乐, 余玮. 等离子体初始温度对强激光与等离子体相互作用中的高能质子产生的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1416~1419
- 18 Abuduresuli, Arken Zaker. Numerical simulation effect of plasma density scale length on the energetic protons generation in laser-plasma interaction[J]. *J. Xinjiang University (Natural Science Edition)*, 2011, **28**(2): 213~217  
阿不都热苏力, 艾尔肯-扎克尔. 等离子体密度标长对高能质子加速的影响[J]. *新疆大学学报(自然科学版)*, 2011, **28**(2): 213~217
- 19 Hong Lei, Hu Zhaowei, Ma Baoliang *et al.*. Monitoring plasma light in laser cladding and melting[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0203006

- 洪 蕾, 胡肇炜, 马保亮 等. 激光熔覆熔凝过程等离子体光声信号的监测[J]. 中国激光, 2011, **38**(2): 0203006
- 20 Gao Xun, Song Xiaowei, Guo Kaimin *et al.*. Optical emission spectral characteristics of glass plasma induced by nanosecond laser pulse[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0315002
- 高 勋, 宋晓伟, 郭凯敏 等. 纳秒激光烧蚀光学玻璃的等离子体发射光谱特性[J]. 中国激光, 2011, **38**(3): 0315002
- 21 Tao Bangyi, Mao Zihua, Huang Haiqing *et al.*. Numerical simulation of underwater inelastic scattering effect on remote-reffectance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0701001
- 陶邦一, 毛志华, 黄海清 等. 非弹性散射对水体遥感反射率影响的数值模拟[J]. 光学学报, 2011, **31**(7): 0701001
- 22 Kong Qing, Zhu Lijun, Wang Jiexiang *et al.*. Electron dynamics in the extra-intense stationary laser field[J]. *Acta Physics Sinica*, 1999, **48**(4): 650~660
- 孔 青, 朱立俊, 王加祥 等. 电子在超强激光场中的动力学特性[J]. 物理学报, 1999, **48**(4): 650~660
- 23 Yu Dingchen, Hao Xiaofei, Hao Dongshan. Influence of filter wave of plasma photonic crystals with tunable defect produced by Compton scattering[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1006001
- 禹定臣, 郝晓飞, 郝东山. 康普顿散射对可调缺陷层等离子体光子晶体滤波的影响[J]. 中国激光, 2011, **38**(10): 1006001