

超强激光与等离子体平面靶相互作用中的自生磁场

阿不都热苏力 艾尔肯·扎克尔 帕力哈提·米吉提

新疆大学物理科学与技术学院, 新疆 乌鲁木齐 830046

摘要 为了解释超强激光与等离子体相互作用时产生的自生磁场及其产生机制,从动力论出发,用理论分析和数值模拟法研究了强激光打平面薄靶时,由温度梯度和密度梯度的非共线性所决定的自生磁场,得到了自生磁场空间分布的时间演化关系。研究表明,当激光入射等离子体时,由于不平行的密度和温度梯度,在等离子体表面会出现自生磁场。这种磁场明显地影响激光吸收和各种输送过程。

关键词 超强激光;平面靶;温度梯度和密度梯度;数值模拟;自生磁场

中图分类号 O434.12 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.083201

Self-Generated Magnetic Field in the Interaction of Ultraintense Laser-Plasma Slab Target

Abuduresuli Aierken Zakeer Palihati Mijiti

School of Physics and Technology, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China

Abstract In order to investigate the mechanism of formation of self-generated magnetic field in laser plasma interaction, the self-generated magnetic field was theoretically analyzed and numerically simulated. Using kinetic theory here the self-generated magnetic field is generated by the nonparallelism of the temperature gradient and density gradient when the intense laser injected to the thin plasma target. The time evolution relation of the spatial distribution of the self-generated magnetic field is obtained. The results show that when laser injected the plasma target, self-generated magnetic field is generated on the surface of the plasma. Because of the nonparallel density gradient and the temperature gradient, this magnetic field considerably affects the absorption of laser and various transmission processes of laser.

Key words ultraintense laser; plasma slab target; temperature gradient and density gradient; simulation; self-generated magnetic field

OCIS codes 320.7110; 140.7090; 350.5400

1 引言

随着工业化的进程和人口的增长及世界经济社会的发展,人类已面临自然资源短缺和环境持续恶化的严重危机。其中尤以化石能源的日益枯竭和在对其大量使用过程中对环境造成的破坏令人类深感危机的严重性。例如,使用煤炭和石油发电时,在消耗了大量宝贵的化石资源的同时,放出的废气严重地污染了环境,使人们的生存空间越来越恶劣。激光核聚变能作为一种新型的能源,具有得天独厚的优越性,它利用海洋中储量丰富的氢原子同位素氘、氚的聚变反应产生的巨大能量来发电,是最清洁、最丰富的能源,因此,激光核聚变能作为优秀的能源形式必将得到更大的发展,从而使其更好地造福于人类。近年来,随着激光核聚变研究的不断深入和高功率激光技术的长足发展,激光核聚变“快点火”中的自生磁场研究取得较大的进展^[1-3]。自1971年J.A.Stamper^[4]利用线圈探测到激光等离子体相互作用过程中的自生磁场之后,Fuchs等^[5-9]对超强激光与等离子体相互作用中产生的自生磁场从理论、计算机模拟以及实验测量等方面进行了深入的研究,并取得了一

收稿日期: 2014-01-14; 收到修改稿日期: 2014-03-06; 网络出版日期: 2014-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(11164030,10965008)

作者简介: 阿不都热苏力(1961—),男,工学博士,教授,主要从事超强激光与等离子体相互作用等方面的研究。

E-mail: abdrusul@sina.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

些新的发现。但是由于超强激光与等离子体相互作用中的自生磁场及其产生机制本身是一个比较复杂的物理过程,到目前为止,在一些关键问题上的研究仍不完善,特别是对超强激光与等离子体平面靶相互作用中自生磁场的产生机制的探索仍不充分,因此,有必要对该方面的关键问题进行深入研究^[10]。

本文对超强激光与等离子体平面靶相互作用中产生的自生磁场及其产生机制进行了理论分析,给出了自生磁场的简单解析表达式,并利用数值模拟方法对由温度梯度和密度梯度的非共线性而引起的自生磁场进行了模拟计算。

2 自生磁场的理论分析

如图1所示,当超强激光照射等离子体薄靶时,由于光压的推动,在激光照射面上形成具有千电子伏特数量级的高能电子,且高能电子流能传输进入靶内部。由于电子的质量较小,对激光的辐射压力响应非常迅速,电子在极短的时间内被辐射压力加速形成电子压缩层,其温度进一步提高,形成区域化的高温高密度的等离子体。高温等离子体形成后,其与激光束继续作用,进一步电离,等离子体的温度和压力迅速升高,并在靶面法线方向形成大的温度和压力梯度,使其沿该方向向外做等温和绝热膨胀,但此时由于固体靶的电子热传导对温度的作用要比等离子体的绝热膨胀有效得多,所以等离子体的温度梯度方向基本与靶面平行。焦斑处的辐照不均匀性将会加剧这种不一致性。这种温度梯度和密度梯度的不一致性所产生的热电动势将引起热电流,并诱发自生磁场。在激光脉冲的持续时间内,这个自生磁场是准稳态的。由于密度梯度是沿靶面的法线方向,而温度梯度则是以激光焦点为中心,在与靶面平行的平面内呈向外辐射状,因此,温度梯度与密度梯度的叉乘所产生的磁场肯定是环形结构(见图2),图2中的不同灰度代表自生磁场大小。随着时间的推移,由于等离子体的对流和扩散,温度梯度和密度梯度逐渐变缓,磁场增长变慢,最后停止增长,达到饱和(见图3)。

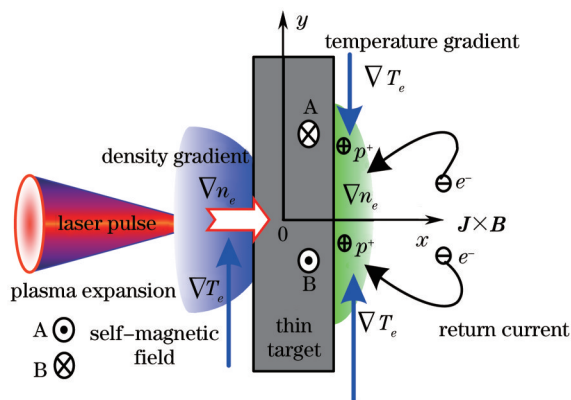


图1 激光与等离子体相互作用中热电机制的产生及其几何模型

Fig.1 Generation and geometric model of thermo-electric mechanism during laser-plasma interaction

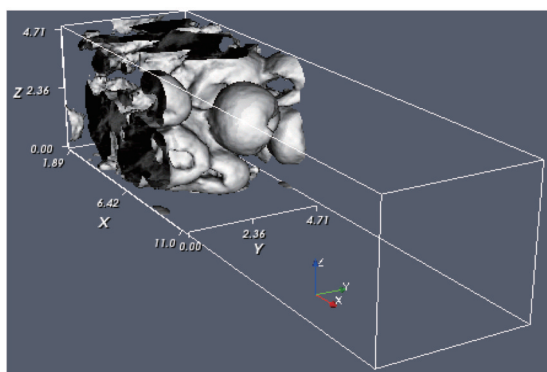


图2 $\omega_L t=140(79\text{ fs})$ 时的自生磁场结构图

Fig.2 Self-generated magnetic field structure at $\omega_L t=140$ (79 fs)

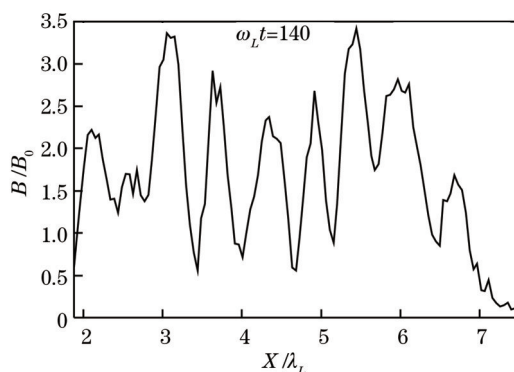


图3 自生磁场随空间的演化图

Fig.3 Spatial evolution chart of self-generated magnetic field at $\omega_L t=140(79\text{ fs})$

为导出计算用方程式,可将固定不动的离子近似为中性背景子,并将电子视为惯性流体。在三维情况下粒子在 x - y - z 平面上运动,有三个速度分量 (v_x, v_y, v_z),质子遵从下列运动方程:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = Ze[\mathbf{E} + (\mathbf{v}_i/c) \times \mathbf{B}], \quad (1)$$

$$\frac{d\mathbf{r}_i}{dt} = \mathbf{v}_i, \quad (2)$$

式中 \mathbf{v}_i 、 Z 分别代表质子速度和质子数, m_i 是质子质量, e 和 c 分别是电子电荷和光速, \mathbf{E} 和 \mathbf{B} 分别是电场和磁场。

而电子遵从下列运动方程:

$$n_e m_e \frac{dv_e}{dt} = en_e[\mathbf{E} + (\mathbf{v}_e/c) \times \mathbf{B}] - \nabla P_e, \quad (3)$$

式中 \mathbf{v}_e 为电子速度, m_e 为电子质量, n_e 为电子密度, P_e 为电子压力。由于电子被视为惯性流体,(3)式的左边电子质量为零,另外由电子的状态方程可求出电子压力:

$$P_e = n_e k_B T_e, \quad (4)$$

式中 k_B 和 T_e 分别为玻尔兹曼常数和电子温度。在线偏振的情况下 T_e 可以表示为^[11]

$$T_e = m_0 c^2 (\sqrt{1 + \lambda_\mu^2 I_{18}/1.37} - 1), \quad (5)$$

式中 $I_{18} = I/10^{18} \text{ W/cm}^2$, 是以 10^{18} W/cm^2 为单位的强度, m_0 为电子静止质量,将(4)式代入(3)式,再消除 P_e 可得

$$0 = -en_e[\mathbf{E} + (\mathbf{v}_e/c) \times \mathbf{B}] - \nabla(n_e k_B T_e). \quad (6)$$

由于本研究涉及的问题是质子运动有关的低频电磁波,一般满足准中性条件,即:

$$n_e = n_i = n, \quad (7)$$

而电流密度 \mathbf{j} 可运用安培定律由下式求得:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{j}_e + \mathbf{j}_i), \quad (8)$$

式中 μ_0 为真空中的磁导率, \mathbf{j}_e 和 \mathbf{j}_i 分别表示电子电流密度和质子电流密度。其中电子电流密度定义为 $\mathbf{j}_e = -en_e \mathbf{v}_e$ 。将这个定义式代入(8)式可求得以下的电子速度公式:

$$\mathbf{v}_e = -\frac{1}{en_e} \left(\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{B} - \mathbf{j}_i \right). \quad (9)$$

同时将(9)式代入(6)式可得:

$$\mathbf{E} = \frac{1}{Zen_i} \left[\frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} - \mathbf{j}_i \times \mathbf{B} - Z \nabla(n_i k_B T_e) \right], \quad (10)$$

对(10)式两边去旋度,且整理后可得:

$$\nabla \times \mathbf{E} = \nabla \times \frac{1}{Zen_i} [-Z \nabla(n_i k_B T_e)] = -\nabla \times \frac{1}{en_i} \nabla(n_i k_B T_e) = -\frac{k}{en_i} (\nabla T_e \times \nabla n_i), \quad (11)$$

将(11)式代入法拉第电磁感应定律:

$$\partial \mathbf{B} / \partial t = -c \nabla \times \mathbf{E}, \quad (12)$$

可分别得到与质子和电子有关的自生磁场热源项:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \frac{ck_B}{en_i} \nabla T_i \times \nabla n_i, \quad (13)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \frac{ck_B}{en_i} \nabla T_e \times \nabla n_e. \quad (14)$$

从(14)式可见,只要温度梯度和密度梯度存在夹角就会产生自生磁场。实验和模拟结果表明,激光沿 x 轴方向传播时,电子密度梯度也是沿 x 轴方向产生(激光电场方向),温度梯度沿 y 轴方向产生(沿着径向)。结果这两个不共线机制所激发的自生磁场的方向沿 z 轴方向,且产生的磁场为环向。

3 粒子模拟模型

粒子模拟方法是通过跟踪大量在自洽电磁场中运动的电子和离子来描述等离子体集体性质的一种动力学方法,是目前应用于“快点火”激光等离子体相互作用数值模拟的主要手段之一。此方法中的计算电磁场部分,采用有限差分时分域(FDTD)模型与Yee 网格(mesh)以计算空间中电磁场随时间的变化。而在麦克斯韦方程式的电流密度项中,除了外加电流密度外,也要加入因等离子体粒子的运动所产生的电流密度。在宏粒子的模拟部分,通常选取粒子云的大小与有限差分模型格网的大小相同,以粒子云的中心位置来代表粒子的位置,当粒子移动时整个粒子云一起跟着移动^[12]。

图4所示是粒子模拟所用的三维Yee 网格模型,其中电场矢量在笛卡儿坐标系中化为三个分量 E_x, E_y, E_z ,分别定义在计算网格的棱心位置;磁场矢量化为三个分量 B_x, B_y, B_z ,分别定义在计算网格的面心位置。在这一模型中每一个磁场分量由四个电场分量环绕;同样,每一个电场分量由四个磁场分量环绕。这种电磁场分量的空间取样方式不仅符合法拉第感应定律和安培定律,而且其空间相对位置也适合麦克斯韦方程的差分计算,能够适当地描述电磁场的传播特性。此外,电场和磁场在时间顺序上交替抽样,抽样时间间隔相差半个时间步长,是麦克斯韦旋度方程离散以后构成的显式差分方程,从而可以在时间上迭代求解,而不需要进行矩阵求逆运算。因而,只要给定相应电磁问题的初始值及边界条件,利用FDTD方法就可以逐步推进地求得以后各个时刻空间电磁场的分布^[13]。

图5是三维粒子模拟模型的电场和磁场离散模型。其中灰色(电场)和黄色(磁场)平面是求解平均电磁场的示意图。在图中的网络点上先由第 m 步时间的电场 E 计算出第 $m+1/2$ 步时间的磁场 B ,然后通过求相邻两网络点平均值的方法求得半网络点处 $(l+1/2, m+1/2)$ 的电磁场。

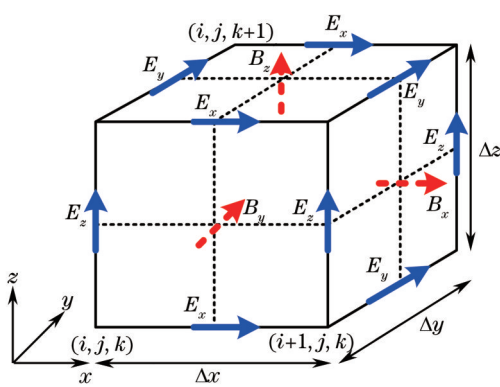


图4 三维Yee 网格模型
Fig.4 3D Yee grid model

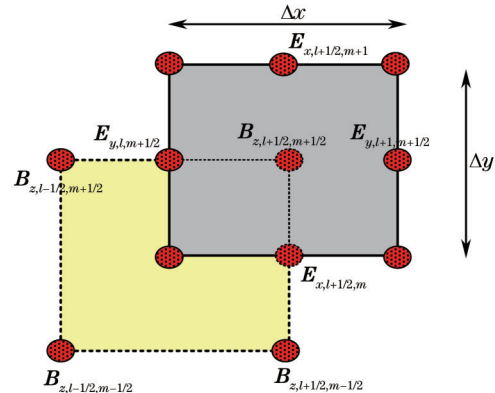


图5 电磁场在网格点上的分布
Fig.5 Spatial layout of electromagnetic fields

利用三维超粒子ZOHARPIC程序在激光功率密度为 $I = 10^{20} \text{ W/cm}^2$ 的条件下,对超短脉冲超强激光与等离子体平面靶的相互作用进行了模拟。研究了超强超短激光脉冲垂直入射到等离子体密度标长为 $L_g = 1 \mu\text{m}$ 和 $L_f = 2 \mu\text{m}$ 的平面靶时的相互作用过程,如图2所示。计算参数选择为:激光沿 y 方向偏振,传播

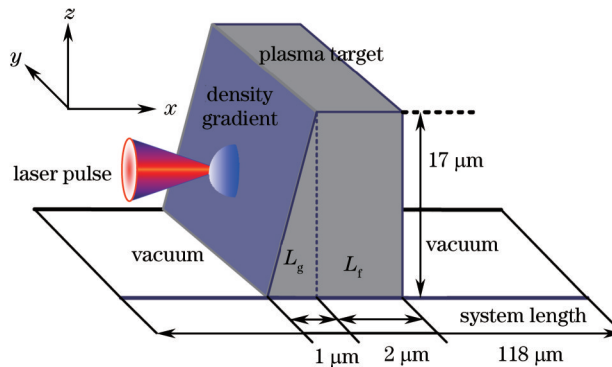


图6 超强激光与平面相互作用示意图
Fig.6 Geometry of interaction of intense laser and target containing the slab

方向为 x 方向;入射激光波长 $\lambda_u = 1.06 \mu\text{m}$,激光频率 $\omega_L = 1.78 \times 10^{15} \text{ rad/s}$,激光束的直径为 $3 \mu\text{m}$,峰值强度为 $I = 10^{20} \text{ W/cm}^2$;激光脉宽为 40 fs ,激光脉冲强度在 y 方向为高斯分布;等离子体密度在 y 方向为均匀分布,最高电子密度分布为 $n_e = 4n_c$,其中 $n_c = 1.0 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$,为与激光波长相对应的等离子体临界密度。模拟中设靶材为密度均匀分布的等离子体铝靶。整个模拟的空间区域大小为 $118 \text{ mm} \times 17 \text{ mm}$,网格数为 3500×500 ,固体靶每个网格的平均宏观粒子数为 60 。离子和电子的质量比为 $m_i/m_e = 1836$,由于超强激光与等离子体相互作用可以迅速将等离子体加热到很高温度,因而忽略电子离子的初始温度影响。初始时刻电子和质子速度均为麦克斯韦热分布,等离子体温度对电子为 1 keV ,对质子为 0.8 keV ,系统含有的粒子数为 7×10^5 。电磁场在 x 方向为吸收边界,在 y 方向上为周期边界。

4 模拟结果

图7是温度和密度梯度的非共线性所激发的自生磁场空间分布图。从图中可以看出,在平面靶表面的 A 点 ($x\omega_L/c = 108, y\omega_L/c = 60$) 和 B 点 ($x\omega_L/c = 108, y\omega_L/c = 32$) 处出现强磁场,其方向分别为向外和向内。产生的强磁场部分位于平面靶背面的表面上。无论从 A, B 中的哪一个点来看,磁场都是由于温度和密度梯度的非共线而产生的。在等离子体表面处,密度梯度的方向对电子加速形成法线方向的电子流。由于这个电子流产生的电流的存在,电子的温度梯度和密度梯度分布呈现扰动,产生准静态自生磁场。图8表示在 A, B 中的任意一点上得到的温度在 y 轴上的时空演化图。图中 y 轴表示时间为 $\omega_L t = 350$ 的温度梯度平均值, x 轴是取 A 点的温度在 y 轴上的时空变化。从图中可以看出,温度梯度在出现强磁场处取峰值,且其方向沿 y 轴方向。从能量的数值模拟来看,电子的有效温度为 $T_e \approx 3.2 \text{ MeV}$,这一估算结果与由前面提出的理论计算公式(5)式得出的结果 $T_e \approx 4 \text{ MeV}$ 较接近。

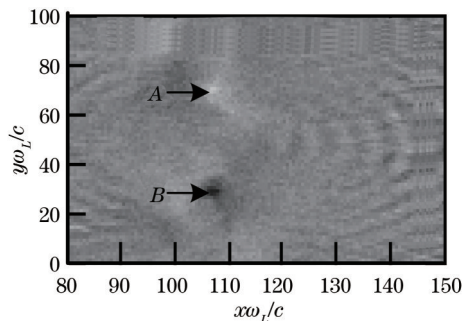


图7 自生磁场的空间分布 ($\omega_L t = 350$)

Fig.7 Spatial distribution of self-generated magnetic field at $\omega_L t = 350$

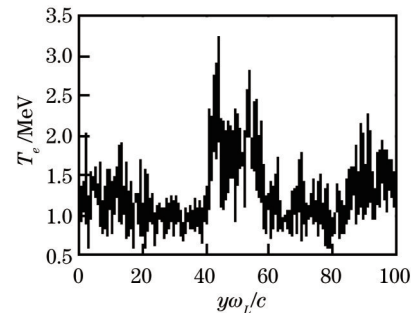


图8 时间 $\omega_L t = 350$ 和线交点 $y\omega_L/c = 60$ 上的温度分布图

Fig.8 Temperature profile on line $y\omega_L/c = 60$ at $\omega_L t = 350$

5 结论

对超强激光与等离子体平面靶相互作用中产生的自生磁场及其产生机制进行了理论分析,给出了自生磁场的简单解析表达式,并利用相对论电磁粒子模拟程序对温度梯度和密度梯度的非共线性过程进行了模拟计算,得到了温度梯度和密度梯度的非共线性所引起的自生磁场空间分布的时间演化和呈现自生磁场处的电子温度峰值。

从理论分析和数值模拟结果可以看出,超强激光与等离子体平面靶相互作用中产生的自生磁场是由温度和密度梯度的非共线而产生的。在等离子体表面处,密度梯度方向被加速的电子将形成法线方向的电子流,由于这个电子流产生的电流的存在,电子的温度梯度和密度梯度分布呈现扰动,产生准静态自生磁场。这个自生磁场被激发后,温度梯度在产生的强磁场处取值最大。

参考文献

- 1 A Abudurexiti, A Pazilaiti, M Palihati. Thermoelectric mechanism for self-generated magnetic field in femtosecond laser-plasma interaction [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(7): 1709-1714.

- 阿不都热苏力, 帕孜来提, 帕力哈提. 飞秒激光与等离子体相互作用中自生磁场的热电机制[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(7): 1709-1714.
- 2 A Abudurexiti, P Tuniyazi, Wang Qian. Self-generated magnetic fields and energy transport by ultraintense laser-plasma interaction [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(12): 3223-3228.
阿不都热苏力, 帕尔哈提, 王倩. 超强激光等离子体相互作用中的自生磁场与能量运输[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(12): 3223-3228.
- 3 A Abudurexiti, P Tuniyazi. Study of self-generated magnetic fields by femtosecond laser plasma interactions [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(s2): s202003.
- 4 J A Stamper. Review on spontaneous magnetic fields in laser produced plasmas: phenomena and measurements [J]. Laser and Particle Beams, 1991, 9(4): 841-862.
- 5 J Fuchs, G Malka, J C Adam, *et al.*. Dynamics of subpicosecond relativistic laser pulse self-channeling in an underdense preformed plasma [J]. Phys Rev Lett, 1998, 80(8): 1658-1661.
- 6 S C Wilks, A B Longdon, T E Cowan, *et al.*. Energetic proton generation in ultra-intense laser-solid interactions [J]. Phys Plasmas, 2001, 8(2): 542-549.
- 7 M Borghesi, A J Mackinnon, R Gaillard, *et al.*. Large quasistatic magnetic fields generated by a relativistically intense laser pulse propagating in preionized plasma [J]. Phys Rev Lett, 1998, 80(23): 5137-5141.
- 8 M Tatarakis, A Gopal, I Watts, *et al.*. Measurements of ultrastrong magnetic fields during relativistic laser plasma interactions [J]. Phys Plasmas, 2002, 9(4): 2244-2250.
- 9 Z Najmudin, M Tatarakis, A Pukhov, *et al.*. Measurements of the inverse faraday effect from relativistic laser interactions with an underdense plasma [J]. Phys Rev Lett, 2001, 87(21): 215004.
- 10 Cai Dafeng, Wang Lijuan, Wang Jian, *et al.*. Self-generation magnetic field in the ultrashort ultrahigh laser-produced plasma research [J]. J Atomic and Molecular Physics, 2009, 26(3): 65-69.
蔡达锋, 王利娟, 王剑, 等. 超短超强激光等离子体中自生磁场的研究[J]. 原子与分子物理学报, 2009, 26(3): 65-69.
- 11 A Abudurexiti, T Okada, S Ishikawa. A mechanism for self-generated magnetic fields in the interaction of ultra-intense laser pulses with thin plasma targets [J]. J Plasmas Physics, 2009, 75(1): 91-98.
- 12 A Abudurexiti, Z Aierken, T Paerhati. Effect of plasma density scale length on energetic protons generation in laser-plasma interaction [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(8): 083201.
阿不都热苏力, 艾尔肯·扎克尔, 帕尔哈提·吐尼亚孜. 激光等离子体密度标长对高能质子加速的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(8): 083201.
- 13 Zhu Zhihong, Ye Weimin, Yuan Xiaodong, *et al.*. Study of transmission characteristics of 2-D photonic crystals by the finite-difference time-domain method [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(5): 522-525.
朱志宏, 叶卫民, 袁晓东, 等. 用时域有限差分法研究二维光子晶体传输特性[J]. 光学学报, 2003, 23(5): 522-525.