

# 康普顿散射对可调缺陷层等离子体 光子晶体滤波的影响

禹定臣 郝晓飞 郝东山\*

(黄淮学院信息工程系, 河南 驻马店 463000)

**摘要** 应用多光子非线性康普顿(Compton)散射模型和时域有限差分方法,研究了多光子非线性 Compton 散射对可调缺陷层等离子体光子晶体滤波的影响。结果表明,等离子体缺陷层几何厚度不变时,随缺陷等离子体层电子密度的增大,多光子非线性 Compton 散射使缺陷模透射峰频率向高频方向迅速移动,缺陷模中心频率向高频方向近乎线性地迅速移动。等离子体缺陷层厚度增大时,多光子非线性 Compton 散射使缺陷模的中心频率向低频方向移动;厚度增加到一定值时,在带隙上边沿处产生一个高于 Compton 散射前频率的缺陷模频率。

**关键词** 非线性光学;等离子体光子晶体;透射谱;缺陷模;时域有限差分法;多光子非线性康普顿散射

**中图分类号** O482.3;O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1006001

## Influence of Filter Wave of Plasma Photonic Crystals with Tunable Defect Produced by Compton Scattering

Yu Dingchen Hao Xiaofei Hao Dongshan

(Department of Information Engineering, Huanghuai University, Zhumadian, Henan 463000, China)

**Abstract** Using the multi-photon nonlinear Compton scattering model and finite-difference time-domain (FDTD) algorithm, the influence of the filter wave of the plasma photonic crystals with tunable defect by the multi-photon nonlinear Compton scattering is studied. The results show that when the geometrical thickness of the plasma tunable defect is a constant, the transmission spectra frequencies of the defect mode are quickly moved to the high frequency direction along with the increases of the electric density in the plasma tunable defect by the multi-photon nonlinear Compton scattering, and its central frequencies nearly are linearly and quickly moved to the high frequency direction. When the geometrical thicknesses of the plasma tunable defect are increased, the central frequencies of the tunable defect mode are moved to the low frequency direction by the multi-photon nonlinear Compton scattering. The thickness is increased to the certain numbers, a higher tunable defect mode frequency than before Compton scattering is taken place on the upper part of the border of the band gap.

**Key words** nonlinear optics; plasma photonic crystals; transmission spectra; defect mode; finite-difference time-domain algorithm; multi-photon nonlinear Compton scattering

**OCIS codes** 160.5298; 350.5400; 120.7000; 290.4210

## 1 引 言

20 世纪 80 年代末,自 Join 等<sup>[1,2]</sup>提出光子晶体概念以来,由于该晶体具有重要的应用前景,如制作光子晶体滤波器<sup>[3]</sup>、光纤<sup>[4]</sup>、发光二极管<sup>[5]</sup>等,因此它已成为一个新的研究方向<sup>[6~9]</sup>。2003 年,Hojo 等<sup>[10]</sup>提出等离子体光子晶体(PPC)概念,由于其具

有常规光子晶体不具备的许多特性,所以倍受人们的关注<sup>[11~13]</sup>。Sakai 等<sup>[14~16]</sup>给出了 PPC 的反射和透射系数,指出小于等离子体频率的电磁波几乎被全反射,透射电磁波出现类似一般光子晶体的带隙特性。Ming 等<sup>[17]</sup>给出了 PPC 的禁带特性,提出了改变温度和等离子体密度分布,实现对非磁化 PPC

收稿日期: 2011-04-11; 收到修改稿日期: 2011-05-29

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: 禹定臣(1970—),男,硕士,副教授,主要从事信号传输方面的研究。E-mail: yudingchen@126.com

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

禁带控制的方法<sup>[18]</sup>。张海锋等<sup>[19]</sup>指出,改变等离子体参量可获得非磁化 PPC 不同禁带周期性。肖晴等<sup>[20,21]</sup>通过改变等离子体的上升时间和密度、等离子体温度与介电常数比及引入缺陷层,分别实现了对时变非磁化和磁化 PPC 禁带的控制、对非均匀 PPC 的带隙控制<sup>[22]</sup>。刘崧等<sup>[23~26]</sup>通过调控缺陷等离子体层参数,实现了 PPC 可调滤波特性以及对滤波通道的调整。应指出的是,在对可调缺陷层 PPC 滤波特性的研究中,均未考虑多光子非线性康普顿(Compton)散射的影响。实验表明,PPC 中的光强达到  $10^{16}$  W/cm<sup>2</sup> 数量级以上时,非线性 Compton 效应开始显现<sup>[27]</sup>。可见,多光子非线性 Compton 散射对缺陷层 PPC 滤波特性的影响是不能忽略的。本文对该问题进行了研究。

## 2 Compton 散射对滤波的影响

### 2.1 电磁波的耦合频率

设沿  $z$  方向传播的一维电磁波(EMW)与 PPC 中的电子发生多光子非线性 Compton 散射(以下简称散射),散射光子的频率为<sup>[28]</sup>

$$\omega_s = \frac{N\omega_0(1 + \beta_0 \cos \theta_0)(1 - \beta_f \cos \theta'_1)}{\eta^2 + \frac{\eta N \hbar \omega_0}{m_0 c^2} \frac{(1 + \beta_0 \cos \theta_0)}{(1 - \cos \theta')^{-1}}}, \quad (1)$$

式中  $\eta = |\gamma_0 - \gamma_f| / (\gamma_0 - 1)$  是量度散射的非弹性参量; $\gamma_{0(f)} = [1 - (v_{0(f)}/c)^2]^{-1/2} = (1 - \beta_{0(f)}^2)^{-1/2}$ ,

$v_{0(f)}, N, m_0, \omega_0, c, \hbar = 2\pi\hbar$  分别为电子散射前后的 Lorentz 因子、电子散射前后的速度、与电子同时作用的光子数、电子静止质量、入射光圆频率、真空中的光速及普朗克常数; $\theta_0$  为散射前电子和光子运动方向夹角, $\theta'_1$  和  $\theta'$  为电子静止系中电子与散射光子运动方向夹角和光子散射角。若仅考虑入射和散射电磁波形成的耦合电磁波的频率为  $\omega_c = \omega_s - \omega_0$  形式,则有

$$\omega_c = \omega_0 \left[ \frac{N(1 + \beta_0 \cos \theta_0)(1 - \beta_f \cos \theta'_1)}{\eta^2 + \frac{\eta N \hbar \omega_0}{m_0 c^2} \frac{(1 + \beta_0 \cos \theta_0)}{(1 - \cos \theta')^{-1}}} - 1 \right]. \quad (2)$$

可见,散射会引起 PPC 中原电场强度、电流密度、磁场强度和碰撞频率的变化。

### 2.2 时域有限差分算法

设  $E_{cx}, H_{cy}, J_x, \nu_{cb}$  分别为耦合电场强度、磁场强度、电流密度和电子有效碰撞频率, $E_x$  和  $\Delta E_x, H_y$  和  $\Delta H_y, J_x$  和  $\Delta J_x, \nu_b$  和  $\Delta \nu_b$  分别为散射前电场强度及其增量、磁场强度及其增量、电流密度及其增量、有效碰撞频率及其增量,即  $E_{cx} = E_x + \Delta E_x, H_{cy} = H_y + \Delta H_y, J_x = J_x + \Delta J_x, \nu_{cb} = \nu_b + \Delta \nu_b$ 。于是,时域有限差分(FDTD)算法的电场强度和电流密度的迭代方程分别为<sup>[29]</sup>

$$\begin{aligned} E_x^{n+1} + \Delta E_x^{n+1} &\approx \left\{ 2\nu_b^2 + [\exp(-\nu_b \Delta t) - 1 + \nu_b \Delta t] \right\}^{-1} \left\{ 2\nu_b^2 - \omega_p^2 \Delta t [1 - \exp(-\nu_b \Delta t)] + \right. \\ &\omega_p^2 [\exp(-\nu_b \Delta t) - 1 + \nu_b \Delta t] \left. \right\} E_x^n + \frac{\Delta t}{\epsilon_0 \Delta z} \left[ H_y^{n+1/2} \left( K_B + \frac{1}{2} \right) - H_y^{n-1/2} \left( K_B - \frac{1}{2} \right) \right] J_x^n + \\ &\left\{ 2\nu_b^2 + [\exp(-\nu_b \Delta t) - 1 + \nu_b \Delta t] \right\}^{-1} \left\{ -\frac{2\Delta t \Delta \omega_p}{\nu_b^{-1} \omega_p^{-1}} [1 - \exp(-\nu_b \Delta t)] + \omega_p^2 \times \right. \\ &\Delta \nu_b \Delta t + 2\omega_p \Delta \omega_p [\exp(-\nu_b \Delta t) - 1 + \nu_b \Delta t] \left. \right\} E_x^n + 2\nu_b^2 + [\exp(-\nu_b \Delta t) - 1 + \nu_b \Delta t] \left. \right\}^{-1} \times \\ &\left\{ 2\nu_b^2 - \frac{\nu_b \Delta t}{\omega_p^2} [1 - \exp(-\nu_b \Delta t)] + \omega_p^2 [\exp(-\nu_b \Delta t) - 1 + \nu_b \Delta t] \right\} \Delta E_x^n + \frac{\Delta t}{\epsilon_0 \Delta z} \times \\ &\left[ \Delta H_y^{n+1/2} \left( K_B + \frac{1}{2} \right) - \Delta H_y^{n-1/2} \left( K_B - \frac{1}{2} \right) \right] - \frac{\Delta t}{2\epsilon_0} [1 + \exp(-\nu_b \Delta t)] \Delta J_x^n, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} H_y^{n+1/2} \left( K_B + \frac{1}{2} \right) + \Delta H_y^{n+1/2} \left( K_B + \frac{1}{2} \right) &\approx \left\{ H_y^{n-1/2} \left( K_B + \frac{1}{2} \right) - \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta z} [E_x^n (K_B + 1) - E_x^n (K_B)] \right\} + \\ &\left\{ \Delta H_y^{n-1/2} \left( K_B + \frac{1}{2} \right) - \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta z} [\Delta E_x^n (K_B + 1) - \Delta E_x^n (K_B)] \right\}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} J_x^{n+1} (K_B) + \Delta J_x^{n+1} (K_B) &\approx \left\{ \exp(-\nu_b \Delta t) J_x^n (K_B) + \frac{\epsilon_0 \omega_p^2}{\nu_b} [1 - \exp(-\nu_b \Delta t)] E_x^n (K_B) + \right. \\ &\left. \frac{[\exp(-\nu_b \Delta t) - 1 + \Delta t] \epsilon_0 \omega_p^2}{\nu_b^2 \Delta t} [E_x^{n+1} (K_B) - E_x^n (K_B)] \right\} + \left\{ \exp(-\nu_b \Delta t) [\Delta J_x^n (K_B)] + \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{2}{\nu_b} [1 - \exp(-\nu_b \Delta t)] \varepsilon_0 \omega_p \Delta \omega_p E_x^n(K_B) + \frac{[1 - \exp(-\nu_b \Delta t)] \varepsilon_0 \omega_p^2}{\nu_b} \Delta E_x^n(K_B) + \\ & \frac{2[\exp(-\nu_b \Delta t) - 1 + \Delta t] \varepsilon_0 \omega_p \Delta \omega_p}{\nu_b^2 \Delta t} [E_x^{n+1}(K_B) - E_x^n(K_B)] + \\ & \left. \frac{[\exp(-\nu_b \Delta t) - 1 + \Delta t] \varepsilon_0 \omega_p^2}{\nu_b^2 \Delta t} [\Delta E_x^{n+1}(K_B) - \Delta E_x^n(K_B)] \right\}, \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $\Delta t$  和  $\Delta z$  分别为时间和空间步长,  $\varepsilon_0$  为真空中的介电常数,  $K_B$  为玻尔兹曼常数,  $\nu_b = 5.2 \times 10^{11} p_0$  [20],  $\Delta \nu_b = 5.2 \times 10^{11} \Delta p_0$ ,  $p_0 = n_e K_B T_p$  和  $\Delta p_0 = \Delta n_e K_B T_p + n_e K_B \Delta T_p$ ,  $n_e$  和  $\Delta n_e$ ,  $T_p$  和  $\Delta T_p$  分别为散射前等离子体压强及其增量、自由电子密度及其增量、温度及其增量, 即有关系  $p_c = p_0 + \Delta p_0$ ,  $n_{ce} = n_e + \Delta n_e$ ,  $T_{cp} = T_p + \Delta T_p$ 。等离子体频率和等效折射率可分别表示为

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{m_0 \varepsilon_0}}, n \approx \sqrt{\frac{1 - \omega_{cp}^2}{\omega_c^2 - j\omega_c \nu_b}}, \quad (6)$$

式中  $\Delta \omega_p = (\Delta n_e e / m_0 \varepsilon_0)^{1/2}$ 。

### 2.3 模型与仿真计算

用于仿真计算非磁化 PPC 的物理模型如图 1 所示, 由 6 层介质层、6 层等离子体层和 1 层缺陷层组成, 其中介质层的折射率和厚度、等离子体层的折射率和厚度、缺陷层的折射率和厚度分别为  $n_a$  和  $a$ ,  $n_b$  和  $b$ ,  $n_d$  和  $d$ 。入射电磁波的频率范围为 0~15 GHz, 其强度在  $10^{16}$  W/cm<sup>2</sup> (电场强度在  $10^{10}$  V/m) 数量级以上。计算初始参数分别取为  $a = b = d = 1$  cm,  $n_a = 1.9$ ,  $\omega_p = 3.9$  Grad/s,  $\nu_b = 0.9 \times 10^7$  Hz。由散射引起的参量增量分别为  $\Delta n_a = 0.1$ ,  $\Delta \omega_p = 0.1$  Grad/s,  $\Delta \nu_b = 0.1 \times 10^7$  Hz。

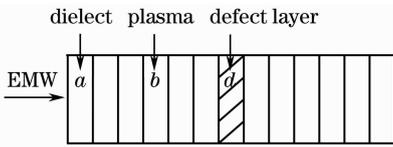


图 1 一维磁化等离子体光子晶体物理模型  
Fig. 1 Physics model of one-dimension and un-magnetic PPCs

取 FDTD 计算的空间步长  $\Delta z = 1$  mm, 根据 Courant 条件, 选取时间步长  $\Delta t = 2$  ps。将 PPC 划分为 130 个网格, 计算空间的两端各设置 5 个网格的完全匹配层吸收边界, 用于吸收截断边界时产生的反射。入射的高斯脉冲的表达式为 [29]

$$E_i(t) = (t - 5\tau) \exp\left[-\frac{(t - 5\tau)^2}{2\tau^2}\right], \quad (7)$$

式中  $\tau = 15\Delta t$ , 其大小决定了脉冲的宽度。

### 2.4 Compton 散射对滤波特性的影响

首先考虑缺陷层厚度不变时电子密度变化情况。仍取等离子体缺陷层的电子密度  $n_e$  分别为 0,  $0.79 \times 10^{16}$ ,  $1.54 \times 10^{16}$ ,  $3.15 \times 10^{16}$  和  $4.54 \times 10^{16}$  m<sup>-3</sup> [19], 透射谱分别为图 2 中的实线、细点虚线、粗虚线、点划线、长划线所示。由图 2 可知,  $n_e = 0$  时, D 层相当于真空, 其等效折射率为 1, 在 PPC 禁带中间出现一个谐振频率为 2 GHz 的缺陷模透射峰; 缺陷层电子密度分别为  $0.79 \times 10^{16}$ ,  $1.54 \times 10^{16}$ ,  $3.15 \times 10^{16}$  和  $4.54 \times 10^{16}$  m<sup>-3</sup> 时, 在 PPC 禁带中间出现的谐振频率分别近似为 2.1, 2.2, 2.4 和 2.5 GHz 的缺陷模透射峰, 相对于文献 [10] 中的数值均有一个增量, 缺陷模透射峰频率随缺陷等离子体层的电子密度的增大向高频方向较快地移动, 这主要是由于散射作用的缘故。另外, 从图 2 中亦可看出, PPC 的禁带位置并未改变, 只是透射层中的谐振频率发生了改变, 引起了透射峰偏移, 因此在 PPC 结构尺寸不变的情况下, 通过散射可实现可调单通道滤波器的滤波特性。

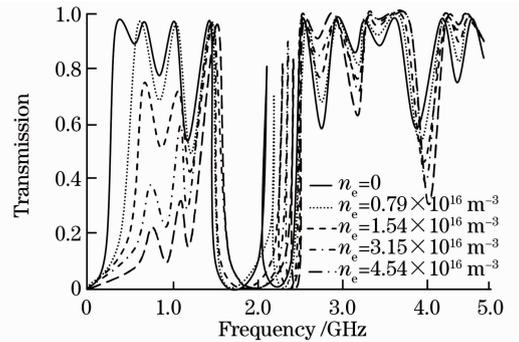


图 2 不同等离子体电子密度时的透射谱  
Fig. 2 Transmission spectrum of different plasma electron densities

图 3 为缺陷等离子体密度  $n_e = 0.79 \times 10^{16}$  m<sup>-3</sup>, 中心谐振频率为 2.1 GHz 的时谐电场能量分布曲线, 其中虚线和实线分别为散射前后的电场能量分布曲线。从图 3 可看出, 电场能量主要集中在缺陷层中, 电磁能量被局域在缺陷附近, 形成谐振, 但散射使缺陷内和缺陷附近的能量比散射前有所增加。由于缺陷对 PPC 空间对称性产生微扰而

形成的微腔具有更高的共振频率,因此,高共振频率附近更多的光波能量被透射出去而实现滤波效果。

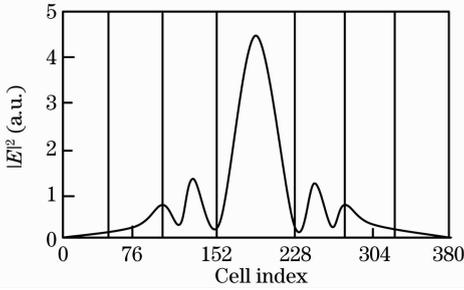


图 3 缺陷模中心谐振频率时谐波的场能量分布  
Fig. 3 Electric energy distribution of the central resonant frequency wave

再考虑缺陷层等离子体层厚度变化情况。取缺陷层电子密度为 0 时,取该层几何厚度分别为  $0.5\lambda_0$ ,  $0.6\lambda_0$  和  $0.7\lambda_0$ ,其他参数同上。由此可得到缺陷模中心频率与厚度关系如图 4 所示,其中实线、虚线和点划线分别对应  $0.5\lambda_0$ ,  $0.6\lambda_0$  和  $0.7\lambda_0$  时的缺陷模中心频率与厚度关系曲线。由图 4 可看出,缺陷模中心频率随厚度的增大向低频方向移动。当厚度增加到一定值时,在带隙的上边沿产生一个较散射前频率高的缺陷模频率,这是由于耦合电磁波在缺陷层中发生相长干涉时,缺陷层厚度的增大使相干缺陷模的中心频率减小(但比散射前的频率大),从而产生新的较高频率缺陷模的缘故。可见,合理控制缺陷等离子体层厚度,散射可使 PPC 在更大带宽范围内实现滤波可调节性。

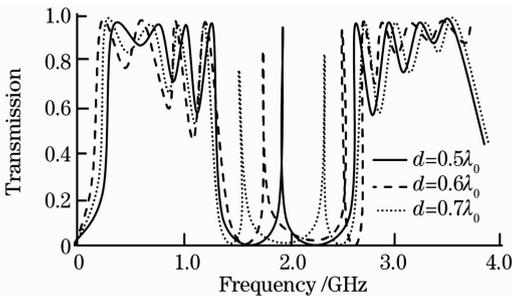


图 4 缺陷等离子体层厚度变化时的透射谱  
Fig. 4 Transmission spectra of different plasma thicknesses

最后考虑缺陷层厚度一定时散射对缺陷模中心频率与电子密度关系的影响。取缺陷层几何厚度为  $0.5\lambda_0$ ,缺陷模中心频率与电子密度关系如图 5 所示,其中虚线和实线分别对应散射前后缺陷模中心频率与其中电子密度的关系曲线。由图 5 可知,二者均随电子密度增大而朝高频方向移动,并近似成线性关系,但散射使移动速度比无散射快,这是因散

射使缺陷模中心频率处于高频状态的缘故。

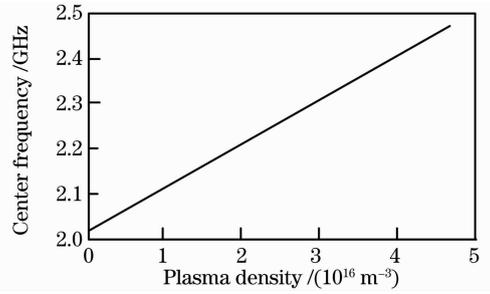


图 5 缺陷模中心谐振频率与缺陷模等离子体密度的关系  
Fig. 5 Relation between the central resonant frequency and the plasma density

### 3 结 论

通过讨论可得到如下结论:

- 1) 等离子体缺陷几何层厚度不变时,散射使缺陷模透射峰频率随缺陷等离子体层的电子密度的增大向高频方向较快地移动;亦使缺陷模的中心频率随缺陷层的电子密度增大近似线性地向高频方向较快地移动。
- 2) 等离子体缺陷层厚度变化时,散射使缺陷模中心频率随缺陷层厚度的增大而向低频方向移动。厚度增加到一定值时,在带隙上边沿处产生一个高于散射前频率的缺陷模频率。

### 参 考 文 献

- 1 S. Join. Localization of photons in certain disordered dielectric super lattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 2 E. Yablonvitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2060
- 3 M. Bayindir, B. Temelkuran, E. Ozbay. Photonic crystal based beam splitters[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(24): 3902~3904
- 4 Ouyang Zhengbiao, An Henan, Ruan Shuangchen *et al.*. Promoting the coupling efficiency of waves by a 2D photonic crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1): 69~72  
殷阳征标, 安鹤男, 阮双琛 等. 利用二维光子晶体提高波的耦合效率[J]. *光子学报*, 2004, **33**(1): 69~72
- 5 Li Yan, Zheng Ruisheng, Feng Yuchun *et al.*. Influence of disordered photonic crystal on light extraction of a kind of light emitting diode model[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(6): 903~905  
李 岩, 郑瑞生, 冯玉春 等. 一种发光二极管模型中无序光子晶体对光输出的研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(6): 903~905
- 6 Mei Luoqin, Ye Weimin, Zeng Chun *et al.*. Characteristic properties of transmission research of 2-D photonic crystals using the transfer matrix method (TMM)[J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2005, **9**(2): 88~92  
梅洛勤, 叶卫民, 曾 淳 等. 用传输矩阵法(TMM)研究二维光子晶体传输特性 [J]. *量子光学学报*, 2005, **9**(2): 88~92
- 7 Liu Bowen, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. 39 fs, 16 W all

- photonic crystal fiber laser system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 811~814
- 刘博文, 胡明列, 宋有建等. 39 fs, 16 W 全光子晶体光纤飞秒激光系统[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 811~814
- 8 Fang Xiaohui, Hu Minglie, Liu Bowen *et al.*. Hundreds of megawatts peak power multi-core photonic crystal fiber laser amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2366~2370
- 方晓惠, 胡明列, 刘博文等. 百兆瓦峰值功率的多芯光子晶体光纤飞秒激光放大系统[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2366~2370
- 9 Liu Bowen, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. Photonic crystal fiber femtosecond laser amplifier with millijoules and 100 fs level output[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2415~2418
- 刘博文, 胡明列, 宋有建等. 微焦耳、百飞秒光子晶体光纤飞秒激光放大器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2415~2418
- 10 H. Hojo, K. Akimoto, A. Mase. Enhanced wave transmission in one-dimensional plasma photonic crystals [C]. Conference digest on 28th International Conference Infrared and Millimeter Waves, Japan, 2003. 347~348
- 11 H. Hojo, A. Mase. Dispersion relation of electromagnetic waves in one-dimensional plasma photonic crystals [J]. *J. Plasma Fusion Res.*, 2004, **80**(2): 89~90
- 12 Li Wei, Zhang Haitao, Gong Mali *et al.*. Plasma photonic crystal[J]. *Optical Technology*, 2004, **30**(3): 263~266
- 李伟, 张海锋, 巩马理等. 等离子体光子晶体[J]. *光学技术*, 2004, **30**(3): 263~266
- 13 Liu Shaobin, Zhu Chuanxi, Yuan Naichang. FDTD simulation for plasma photonic crystals [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(6): 2804~2808
- 刘少斌, 朱传喜, 袁乃昌. 等离子体光子晶体的 FDTD 分析[J]. *物理学报*, 2005, **54**(6): 2804~2808
- 14 O. Sakai, T. Sakaguchi, Y. Ito *et al.*. Interaction and control of millimetre-waves with micro-plasma arrays [J]. *Plasma Phys. Control Fusion*, 2005, **47**: B617~B627
- 15 O. Sakai, T. Sakaguchi, K. Tachibana. Verification of a plasma photonic crystal for microwaves of millimeter wavelength range using two-dimensional array of columnar micro-plasmas [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(24): 241505
- 16 Liu Shaobin, Gu Changqing, Zhou Jianhong *et al.*. TDFD simulation for magnetized plasma photonic crystals [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(3): 1283~1288
- 刘少斌, 顾长青, 周建红等. 磁化等离子体光子晶体 FDTD 分析[J]. *物理学报*, 2006, **55**(3): 1283~1288
- 17 S. T. Ming, S. Ronan, R. Anthony *et al.*. Analysis of electromagnetic band-gap waveguide structures using body-of-revolution finite-difference time-domain method [J]. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 2007, **49**(9): 2201~2206
- 18 Zhang Haifeng, Ma Li, Liu Shaobin. Effects of plasma temperature and density to the characteristic of band gap structure for un-magnetized plasma photonic crystal [J]. *Journal of Nanchang University (Natural Science)*, 2007, **31**(6): 540~544
- 张海锋, 马力, 刘少斌. 温度、密度对非磁化等离子体光子晶体禁带特性的影响[J]. *南昌大学学报(自然科学版)*, 2007, **31**(6): 540~544
- 19 Zhang Haifeng, Ma Li, Liu Shaobin. Periodic band gap structure for un-magnetized plasma photonic crystals [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(8): 1566~1570
- 张海锋, 马力, 刘少斌. 非磁化等离子体光子晶体的禁带周期性研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(8): 1566~1570
- 20 Xiao Qing, Ma Li, Zhang Meng. Study on the band gap structure for time-varying un-magnetized plasma photonic crystals [J]. *Journal of Nanchang University (Natural Science)*, 2009, **33**(3): 265~267
- 肖晴, 马力, 张萌. 时变非磁化等离子体光子晶体禁带特性[J]. *南昌大学学报(自然科学版)*, 2009, **33**(3): 265~267
- 21 Zhang Haifeng, Ma Li, Liu Shaobin. The forbidden band gap of time-varying magnetized plasma photonic crystals [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2009, **30**(2): 142~146
- 张海锋, 马力, 刘少斌. 时变磁化等离子体光子晶体的带隙特性[J]. *发光学报*, 2009, **30**(2): 142~146
- 22 Liu Song, Liu Shaobin. Analysis of photonic band gap in inhomogeneous plasma photonic crystals [J]. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 2009, **29**(4): 365~369
- 刘崧, 刘少斌. 非均匀分布等离子体光子晶体带隙分析[J]. *核聚变与等离子体物理*, 2009, **29**(4): 365~369
- 23 Liu Song, Liu Shaobin, Wang Shenyun. Fiber property analysis of plasma photonic crystals with tunable defect [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(2): 146~150
- 刘崧, 刘少斌, 王身云. 可调缺陷层等离子体光子晶体的滤波特性分析[J]. *光电工程*, 2010, **37**(2): 146~150
- 24 Zhang Haifeng, Xiao Zhengquan, Yang Guohua *et al.*. Effect of plasma temperature and density on the defect mode in magnetized plasma photonic crystals [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2010, **31**(1): 1~6
- 张海锋, 肖正泉, 杨国华等. 温度、密度对磁化等离子体光子晶体缺陷模的影响[J]. *发光学报*, 2010, **31**(1): 1~6
- 25 Zhang Haifeng, Zheng Jianping, Wang Shenyun. Filtering properties of one dimensional tunable magnetized plasma photonic crystal with single defective layer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(9): 1572~1577
- 张海锋, 郑建平, 王身云. 含单缺陷层的一维可调谐磁化等离子体光子晶体滤波特性研究[J]. *光子学报*, 2010, **39**(9): 1572~1577
- 26 Miao Guiling, Zhang Haifeng, Ma Li. Temperature and density properties of prohibit band gaps for one dimension time-varying un-magnetized plasma photonic crystals [J]. *Journal of Nanchang University (Natural Science)*, 2010, **34**(1): 66~74
- 缪贵玲, 张海锋, 马力. 一维时变等离子体光子晶体禁带的密温特性[J]. *南昌大学学报(自然科学版)*, 2010, **34**(1): 66~74
- 27 Kong Qing, Zhu Lijun, Wang Jiaxiang *et al.*. Electron dynamics in the extra-intense stationary laser field [J]. *Acta Physica 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
- 28 Hao Xiaofei, Hao Dongshan. Ablation effect to solid irradiated by high power laser-plasma punched wave under Compton scattering [J]. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 2008, **28**(2): 111~114
- 郝晓飞, 郝东山. Compton 散射下的强激光等离子体冲击波对固体的热蚀效应对[J]. *核聚变与等离子体物理*, 2008, **28**(2): 111~114
- 29 A. B. Petrin. Transmission of microwaves through magnetoactive plasma [J]. *IEEE. Trans. Plasma Sci.*, 2001, **29**(3): 471~478