

# 温度、密度对磁化等离子体光子晶体缺陷模的影响

章海锋, 肖正泉, 杨国华, 王 勇

(中国人民解放军炮兵学院 南京分院, 江苏 南京 211132)

**摘要:** 采用等温近似, 用磁化等离子体的分段线形电流密度卷积 (Piecewise Linear Current Density Recursive Convolution, PLCDRC) 时域有限差分 (Finite-difference Time-domain, FDTD) 算法研究了具有单一缺陷层的一维磁化等离子体光子晶体的缺陷模特性; 以高斯脉冲为激励源, 用算法公式计算所得的电磁波透射系数, 讨论了温度和等离子体层密度对其缺陷模的影响。结果表明: 改变温度和等离子体层密度可以获得不同的缺陷模。

**关键词:** 磁化等离子体光子晶体; 缺陷模; 时域有限差分法

中图分类号: O431.1

PACS: 42.70.Qs

PACC: 4225B

文献标识码: A

## 1 引 言

20世纪80年代末, John<sup>[1]</sup>和Yablonovitch<sup>[2]</sup>最早提出了光子晶体的概念。近年来这已经成为深受关注的一个新兴的研究方向<sup>[3~7]</sup>。光子晶体是由多种介质材料构成, 不同介质材料在空间中有周期性的分布结构。它具有一定的光子能带结构, 使一定频率的光不能在光子晶体中传播, 从而产生了光子禁带。当光子晶体引入缺陷后, 可以使得光子局域化(即在光子禁带中出现模密度较大的局域模)。人们利用光子晶体的这个特性可以制造高效率<sup>[8]</sup>和零阈值的激光器<sup>[9]</sup>、高品质的谐振腔<sup>[10]</sup>等器件。等离子体光子晶体是由Hojo等<sup>[11]</sup>提出, 是由等离子体和介质或真空构成的人工周期性结构。磁化等离子体既具有各项异性, 又有频率色散和耗散特性, 此特性使得磁化等离子体光子晶体具有与常规介质光子晶体所不同的光子禁带特性。文献[12~14]仅对在不考虑外磁场、非时变的和等离子体层分布均匀的等离子体光子晶体进行了研究, 然而磁化等离子体光子晶体在实际应用过程中, 工作环境的温度一般不恒定而且等离子体的密度存在梯度。因此, 研究温度和密度对磁化等离子体光子晶体缺陷模的影响在工程应用方面具有重要的理论意义。

本文主要针对磁化等离子体光子晶体进行了研究。采用磁化等离子体的分段线形电流密度卷积时域有限差分(PLCDRC-FDTD)算法分析各向异性的、碰撞的、热的磁化等离子体光子晶体的缺陷模特性, 并对电磁波在光子晶体内部的传播进行了仿真计算。通过计算电磁波的透射率, 获得其缺陷模, 并讨论了温度和密度对缺陷模的影响。

## 2 仿真计算的PLCDRC-FDTD算法

本文采用磁化等离子体的PLCDRC-FDTD算法进行仿真计算。该算法不仅可以保证较低的计算时间和存储空间, 而且具有较高的计算精度。该算法的电场分量和电流密度分量的迭代方程如下<sup>[15]</sup>:

$$E_x^{n+1} = \frac{X}{Z} E_x^n + \frac{U}{Z} E_y^n - \frac{Y}{Z} J_x^n + \frac{W}{Z} J_y^n - \frac{\Delta t}{\epsilon_0 \Delta z DZ} (H_y^{n+1/2} - H_y^{n-1/2}) + \frac{V}{Z} (H_x^{n+1/2} - H_x^{n-1/2}), \quad (1)$$

$$E_y^{n+1} = \frac{X}{Z} E_y^n - \frac{U}{Z} E_x^n - \frac{Y}{Z} J_y^n - \frac{W}{Z} J_x^n + \frac{\Delta t}{\epsilon_0 \Delta z DZ} (H_x^{n+1/2} - H_x^{n-1/2}) - \frac{V}{Z} (H_y^{n+1/2} - H_y^{n-1/2}), \quad (2)$$

$$J_x^{n+1} = E_x^{n+1} (\sigma^0 - \xi^0) + E_x^n \xi^0 + \exp(-v\Delta t) J_x^n - \omega_p \Delta t \exp(-v\Delta t/2) J_y^{n+1/2}, \quad (3)$$

$$J_y^{n+1} = E_y^{n+1}(\sigma^0 - \xi^0) + E_y^n \xi^0 + \exp(-v\Delta t) J_y^n + \omega_b \Delta t \exp(-v\Delta t/2) J_x^{n+1/2}, \quad (4)$$

$$v(\mathbf{r}) = 5.2 \times 10^{11} p, \quad (5)$$

$$p = n_e(\mathbf{r}) kT, \quad (6)$$

$$\omega_p^2 = n_e(\mathbf{r}) e^2 / m \epsilon_0, \quad (7)$$

式中  $E_x$ 、 $E_y$  是电场强度,  $H_x$ 、 $H_y$  是磁场强度  $J_x$ 、 $J_y$  是电流密度,  $\epsilon_0$  是真空中介电常数,  $\Delta t$  是时间步长。  $\omega_p^2$  是等离子体频率的平方;  $n_e(\mathbf{r})$  是自由电子密度;  $v(\mathbf{r})$  是电子有效碰撞频率;  $\mathbf{r}$  是等离子体空间位置矢量;  $e$ 、 $m$  分别是电子电量和质量;  $k$  是波尔兹曼常数;  $T$  是等离子体温度;  $p$  是等离子体压强。电子碰撞频率与等离子体压强的关系式(5)参考文献[16]。式(6)已假设等离子体取等温近似。式(1)、(2)、(3)、(4)中的其它参量定义见文献[13]。磁场的迭代公式与常规 FDTD 公式相同。电介质部分的处理与常规 FDTD 算法相同。

### 3 模型与仿真计算

用于仿真计算磁化等离子体光子晶体的物理模型如图 1 所示,由 6 层介质层、6 层等离子体层和 1 层缺陷层组成。电磁(EM)波从左向右均匀垂直射入,外磁场的方向和电磁波传播的方向相同,且令该方向为  $+z$  方向,入射波的频率范围为  $0 \sim 15$  GHz。仿真计算的初始参数定为  $a = b = c = 1$  cm,介质层的介电常数为 7,缺陷层的介电常数为 4.5,等离子体碰撞频率为  $v = 3 \times 10^9$  rad/s,外加磁场强度为  $B = 90.5$  T,等离子体回旋频率为  $\omega_b = 10 \times 10^9$  rad/s,等离子体频率为  $\omega_p = 7\pi \times 10^9$  rad/s。

取 FDTD 计算的空间步长为 1 mm,根据 Courant 条件,选取时间步长  $\Delta t = 2$  ps。将 13 cm 厚的等离子体光子晶体划分为 130 个计算网格。计算空间的两端各设两个吸收边界,用于吸收截断边界时产生的反射。吸收边界为完全匹配层(Perfect Matched Layer, PML),占据 5 个网格。沿  $+z$  轴传播的入射电磁波为高斯脉冲,该脉冲的表达式由下式给出:

$$E_i(t) = -A \frac{(t - 6\tau)}{\tau} \exp\left[-\frac{4\pi(t - 6\tau)^2}{30\tau}\right], t \leq 10\tau,$$

$$E_i(t) = 0, t > 10\tau,$$

式中  $\tau$  为常量。仿真计算时  $\tau = 40$  ps,  $A = 4.67$  V/m。为了获得磁化等离子体光子晶体的禁带特性,在仿真计算 10 000 步后,用在时域得到的电

场分量通过傅里叶变换转换到频域,然后将频域电场分量组合成右旋极化波(Right-handed Circularly Polarized, RCP)和左旋极化波(Left-handed Circularly Polarized, LCP)的频域透射率。即透射率可写为

$$\tau_{RCP}(\omega) = \hat{E}_{xt}(\omega) + j_g \hat{E}_{yt}(\omega), \quad (8)$$

$$\tau_{LCP}(\omega) = \hat{E}_{xt}(\omega) - j_g \hat{E}_{yt}(\omega), \quad (9)$$

下面就以等离子体的密度和温度为参数来讨论对磁化等离子体光子晶体缺陷模的影响。

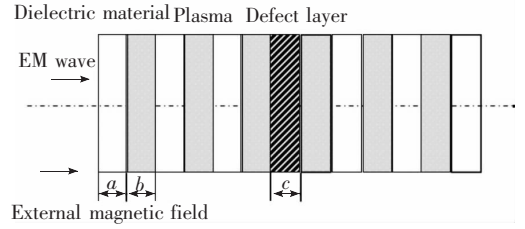


图 1 一维磁化等离子体光子晶体的物理模型

Fig. 1 Physical model of one-dimension magnetized plasma photonic crystals

### 4 温度对缺陷模的影响

图 2 和图 4 给出了等离子体层均匀分布,  $T = 300, 3\ 000, 30\ 000, 46\ 000$  K 时左旋和右旋极化波的透射率频谱图。图 3 和图 5 给出了等离子体层均匀分布,  $T = 300 \sim 30\ 000$  K 时 LCP 和 RCP 波的透射率频谱图。由图 2 和图 3 可知,在 LCP 波产生的光子禁带中存在着明显的缺陷模,随着温度的升高光子禁带的宽度和周期性几乎不变,缺陷模也几乎不会发生移动,缺陷的频率保持不变,缺陷模和透射率的峰值会随着温度的升高而减小,

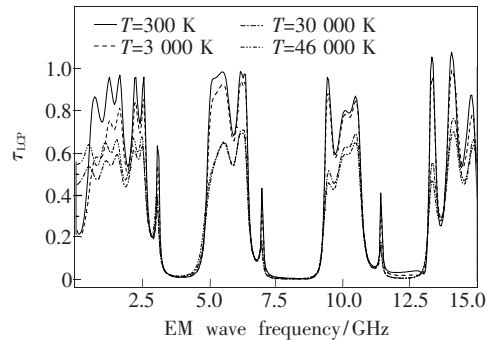


图 2 等离子体均匀分布,  $T = 300, 3\ 000, 30\ 000, 46\ 000$  K 时左旋极化波的透射率频谱

Fig. 2 Transmission coefficients magnitude versus frequency for LCP wave with homogeneous plasma density as  $T = 300, 3\ 000, 30\ 000, 46\ 000$  K.

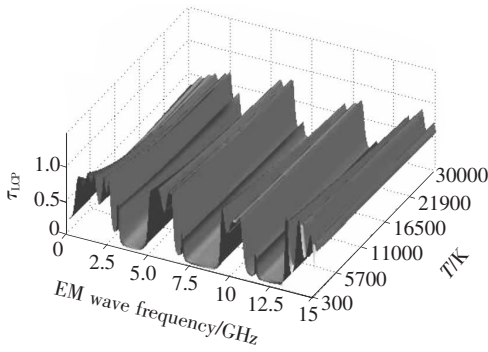


图3 等离子体均匀分布,  $T = 300 \sim 30\,000$  K 时左旋极化波的透射率频谱

Fig. 3 Transmission coefficients magnitude versus frequency for LCP wave with homogeneous plasma density as  $T = 300 \sim 30\,000$  K

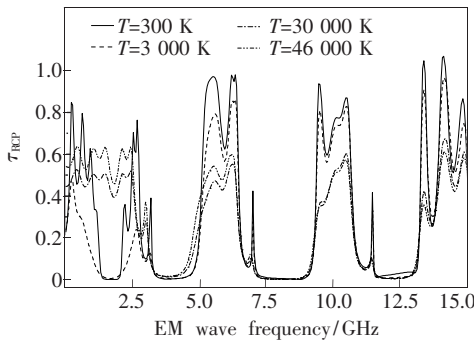


图4 等离子体均匀分布,  $T = 300, 3\,000, 30\,000, 46\,000$  K 时右旋极化波的透射率频谱

Fig. 4 Transmission coefficients magnitude versus frequency for RCP wave with homogeneous plasma density as  $T = 300, 3\,000, 30\,000, 46\,000$  K

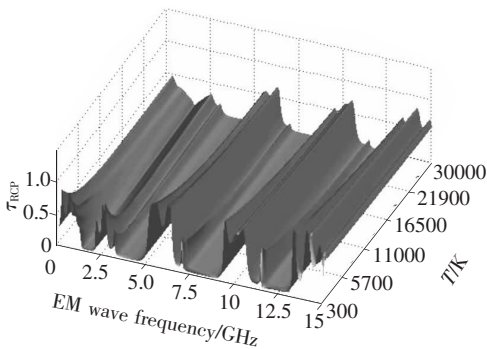


图5 等离子体均匀分布,  $T = 300 \sim 30\,000$  K 时右旋极化波的透射率频谱

Fig. 5 Transmission coefficients magnitude versus frequency for RCP wave with homogeneous plasma density as  $T = 300 \sim 30\,000$  K

图5可知,在右旋极化波产生的光子禁带中也存在着明显的缺陷模,但是禁带的低频部分不存在明显的缺陷模,随着温度的升高 RCP 波的禁带和缺陷模特性完全和 LCP 波的禁带和缺陷模特性相同。这主要是因为当温度较低时等离子体中的电子和中性粒子、离子的碰撞频率较小,没有足够的粒子参与能量传递,等离子体表现为吸波能力不强,即透射率值较大。随着温度的升高电子和中性粒子、离子的碰撞频率增大,等离子体的碰撞频率增大。即参与能量传递的粒子增多,等离子体吸波能力明显,透射率值下降明显。但是温度太高时,等离子体内的电子频繁地与中性粒子和离子碰撞,等离子体内的电子被 EM 波极化的数量相对减少了,即电子还未真正被 EM 波加速就和其他粒子发生碰撞;此时等离子体的吸波能力反而下降了,所以表现为透射率峰值在明显下降后的缓慢上升。而缺陷模的产生是起源于缺陷层反射的 EM 波和行进的 EM 波发生的干涉相长作用,所以缺陷模峰值的变化规律和透射率峰值完全相同。

当 EM 波的频率太大时,电子的极化周期变短,EM 波传递给电子的能量必须靠碰撞传递给其它粒子,故 EM 波频率越大,温度越高,衰减常数越小。当入射 EM 波的频率接近最大等离子体频率时,由于 EM 波的频率接近截止区<sup>[15]</sup>,等离子体对 EM 波的衰减将变得非常大,即共振衰减。当入射 EM 波的频率远离最大等离子体频率时,等离子体对 EM 波的衰减主要是碰撞吸收。共振衰减比碰撞衰减要大很多。如图4,  $T = 300$  K 时, RCP 波产生的光子禁带图谱中在  $1.25 \sim 2.5$  GHz 明显存在着光子禁带,但随着温度的升高禁带宽度逐渐变窄,当  $T = 46\,000$  K 时已经完全消失。所以随着温度的升高,低频段的禁带中心频率会向低频方向移动直至消失。总之,温度参量几乎不会影响其禁带的周期性,仅靠提高等离子体的温度,不能实现对其禁带的拓展但能对低频段禁带带宽造成影响,不能改变缺陷模的频率但能对缺陷模的峰值造成影响,其变化规律和透射率的峰值变化规律相同,即表现为先减小后增大最后趋于定值。

## 5 等离子体密度对缺陷模的影响

为了分析等离子体密度对缺陷模特性的影

但是当温度升高到一定值后缺陷模和透射率峰值不会再减小而是缓慢上升后趋于定值。由图4和

响,等离子体密度分别选取 a) 线性; b) 抛物线; c) Epstein 分布。可以得到其等离子体频率的平方表达式分别为

$$a) \omega_p^2(z) = \omega_{p0}^2 \frac{z}{z_0},$$

$$b) \omega_p^2(z) = \omega_{p0}^2 \left( \frac{z}{z_0} \right)^2,$$

$$c) \omega_p^2(z) = \frac{\omega_{p0}^2}{1 + \exp[-(z - z_0)/2]/\sigma]},$$

式中  $\omega_{p0}$  是最大等离子体频率。 $z_0$  是第 1 层等离子体的左边界到第 6 层等离子体的右边界的距离,  $\sigma$  是 Epstein 分布的梯度因子且取  $\sigma = 2$ 。

图 6 和图 7 分别给出了温度  $T = 1\ 000\ \text{K}$  时, 三种不同密度分布在最大等离子体频率为 1, 5, 10 GHz 的 LCP 和 RCP 波的透射频谱图。由图 6 和图 7 可知, 通过改变等离子体密度分布在保持禁带的周期性的同时可以实现对光子禁带的拓展和缺陷模的控制, 等离子体的电子密度越高其禁带的宽度越大, 缺陷模峰值越小、缺陷模频率越高, 密度越低其禁带宽度越窄, 缺陷模峰值越大、缺陷模频率越低。这主要是因为当入射 EM 波的频率一定时, 等离子体中的电子被 EM 波的电场加速, 吸收 EM 波的能量, 同时通过碰撞把能量传给中性粒子和离子, 从而实现对入射 EM 波的吸收。电子密度越低, 等离子体越稀薄, 从而被 EM 波极化的电子也越少, 等离子体对 EM 波的吸收也相应越小; 相反, 电子密度越大, 等离子体越稠密, 被 EM 波极化的电子也越多, 等离子体对 EM 波的吸收也相应越大。在相同温度和相同体积下等离子体线性分布时参与碰撞的电子数较 Epstein

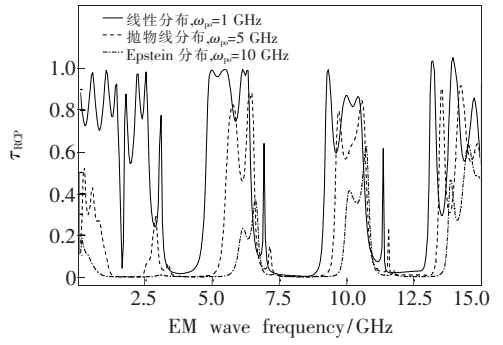


图 7  $T = 1\ 000\ \text{K}$  时, 三种不同密度分布,  $\omega_{p0} = 1, 5, 10\ \text{GHz}$  的右旋极化波的透射的频谱图。

Fig. 7 Transmission coefficients magnitude versus frequency for RCP wave with three different kinds of plasma densities as  $T = 1\ 000\ \text{K}$ ,  $\omega_{p0} = 1, 5, 10\ \text{GHz}$ .

分布时少, 所以对相应入射波的衰减也越弱。同理, 线性分布时在缺陷层中行进 EM 波和发射的 EM 波发生干涉相长的作用较 Epstein 分布时更为明显, 所以缺陷模的峰值就越高, 缺陷模特征明显。因此, 可以利用对等离子体的层密度的控制来实现对缺陷模的控制, 但无论等离子体层的分布如何, 都不可以通过改变等离子体的温度来实现对禁带的拓展, 调节禁带的周期性, 改变缺陷模的频率。

## 6 结 论

采用等温近似, 用 PLCDRC-FDTD 算法研究了具有单一缺陷层的一维非时变磁化等离子体光子晶体的缺陷模特性。以高斯脉冲为激励源, 引入了 PML 吸收边界。用算法公式计算所得的 EM 波透射系数来讨论了温度和密度对其缺陷模的影响。结果表明: 对由 LCP 和 RCP 波形成的光子禁带中都存在明显的缺陷模, 仅仅改变温度参量几乎不能实现对禁带周期性和宽度的改变, 而且也不能实现对缺陷模频率的控制。如果温度参量在很大范围改变仅仅会对缺陷模和透射率峰值造成影响, 在低频部分表现得尤为明显。改变等离子体密度同样会对影响禁带和缺陷模特性, 等离子体密度越大禁带宽度越宽, 缺陷模峰值越小, 缺陷模不明显。等离子体密度越小禁带宽度越窄, 缺陷模峰值越大, 缺陷模明显。总体上缺陷模特性和禁带宽度对温度不敏感, 对等离子体层的密度较为敏感。因此, 可以同时改变等离子体的密度和温度来实现对禁带的控制和缺陷模的调整。

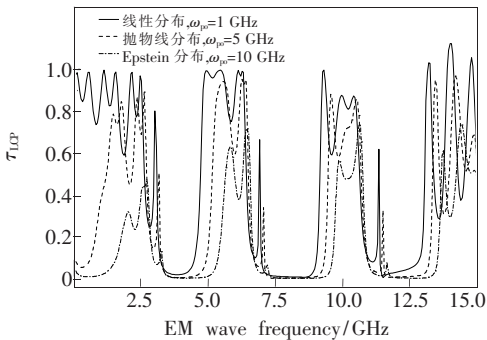


图 6  $T = 1\ 000\ \text{K}$  时, 三种不同密度分布,  $\omega_{p0} = 1, 5, 10\ \text{GHz}$  的左旋极化波的透射的频谱图。

Fig. 6 Transmission coefficients magnitude versus frequency for LCP wave with three different kinds of plasma densities as  $T = 1\ 000\ \text{K}$ ,  $\omega_{p0} = 1, 5, 10\ \text{GHz}$ .

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58** (20):2059-2062.
- [ 2 ] John S. Localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23):2486-2489.
- [ 3 ] Mei Luoqin, Ye Weimin, Zen Chun. Characteristic properties of transmission research of 2-D photonic crystals using the transfer matrix method (TMM) [J]. *Acta Sinica Quantum Optica* (量子光学学报), 2005, **9**(2):88-92 (in Chinese).
- [ 4 ] Li Hongtao, Shao Mingzhu, Luo Shiyu. Band structure of one-dimensional photonic crystal with dielectric constant as a sine-squared function in coordinate space [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2008, **29**(2):229-232 (in Chinese).
- [ 5 ] Chen Haibo, Gao Yingjun, Hu Shumei. Properties of mirror symmetrical photonic crystals of dielectric constant defect layer with imaginary part [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2008, **29**(2):233-237 (in Chinese).
- [ 6 ] Yan Mingbao, Wang Hailong, Zhou Ping. Transmission properties of 2D photonic crystals with triangular dielectric rods [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2009, **30**(1):1-6 (in English).
- [ 7 ] Zhang Haifeng, Ma Li, Liu Shaobin. The forbidden band gap of time-varying magnetized plasma photonic crystals [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2009, **30**(2):142-146 (in Chinese).
- [ 8 ] Yakoyama H, Nishi K, Anan T, *et al.* Controlling spontaneous emission and threshold-less laser oscillation with optical microcavities [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1992, **24**(2):245-275.
- [ 9 ] Villeneuve P R, Fan S, Joannopoulos J D. Microcavities in photonic crystals: mode symmetry, tenability, and coupling efficiency [J]. *Phys. Rev. B*, 1996, **54**(11):7837-7842.
- [ 10 ] Fan S, Villeneuve P R, Joannopoulos J D, *et al.* High extraction efficiency of spontaneous emission from slabs of photonic crystals [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(17):3294-3297.
- [ 11 ] Hojo H, Mase A. Dispersion relation of electromagnetic wave in one-dimensional plasma photonic crystals [J]. *J. Plasma Fusion Res.*, 2004, **80**(2):89-92.
- [ 12 ] Li Shaobin, Hong Wan, Yuan Naichang. Finite-difference time-domain analysis of unmagnetized plasma photonic crystals [J]. *Int. J. Inf. Millimeter Waves*, 2006, **27**(3):403-423.
- [ 13 ] Zhang Haifeng, Ma Li, Liu Shaobin. Periodic band gap structure for unmagnetized plasma photonic crystals [J]. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 2008, **37**(8):1566-1570 (in Chinese).
- [ 14 ] Ma Li, Zhang Haifeng, Liu Shaobin. Study on the defect mode properties of unmagnetized plasma photonic crystals [J]. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 2008, **57**(8):5089-5094 (in Chinese).
- [ 15 ] Zhuang Zhuowen, Yuan Naichang, Liu Shaobin, *et al.* *Plasma Stealth Technology* [M]. Beijing: Science Press, 2005 (in Chinese).
- [ 16 ] Petrin A B. Transmission of microwaves through magnetoactive plasma [J]. *IEEE. Trans. Plasma Sci.*, 2001, **29**(3):471-478.

## Effects of Plasma Temperature and Density on the Defect Mode in Magnetized Plasma Photonic Crystals

ZHANG Hai-feng, XIAO Zheng-quan, YANG Guo-hua, WANG Yong

(Nanjing Branch, Artillery Academy of the Chinese People's Liberation Army, Nanjing 211132, China)

**Abstract:** The piecewise linear current density recursive convolution (PLCDRC) finite-different time-domain (FDTD) method for magnetized plasmas was applied to study the characteristic of defect mode for one dimension magnetized plasma photonic crystals with a defect layer under the isothermal hypothesis. The electromagnetic propagation process of a Gaussian pulse through a magnetized plasma photonic crystal was investigated.

The transmission coefficients through magnetized plasma photonic crystals were calculated, the effects of plasma temperature and density on characteristics of defect modes for magnetized plasma photonic crystals were analyzed with them. The results illustrated that the different defect modes can be obtained by changing plasma temperature and density.

**Key words:** magnetized plasma photonic crystals; defect mode; finite-difference time-domain method

**CLC number:** O431.1

**PACS:** 42.70.Qs

**PACC:** 4225B

**Document code:** A

Received date: 2009-03-23

## 欢迎订阅《光机电信息》(月刊)

本刊由中国光学学会、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所主办,科学出版社出版。

本刊征集光学和应用光学、光电子学和激光、微纳科技、材料科学、电磁学和电子学、机械、信息科学和技术等几大领域如下形式的文章:

### 1. 研究信息快报

本栏目主要报道最新研究成果、阶段新结果、片段新结果的介绍或说明,不要求是纯学术论文。目的是为那些尚未能形成正式研究论文,但希望把已有的最新研究成果、阶段或片段新结果抢先发表的科研工作者提供一个平台,保护广大科研人员的知识产权。主要内容包括研究背景简介、研究过程或实验过程简述、观察到的结果、数据及相关信息说明、评论等,附图表数据等,也可附参考文献(一般不要求)。本栏目发表的论文数据不影响在正式发表论文时使用。

本栏目出版周期:收稿日期为每月5日之后、25日之前收到,下月即出版发表。如为当月5号之前收到,当月发表。

### 2. 研究快报

本栏目主要征集研究新成果的快速报道,要求同其他刊物的研究快报。要求具有如下内容:摘要、关键词、研究背景(引言)、研究过程或实验过程、研究结果、参考文献。

### 3. 研究评论

对当前最新研究结果或研究动态的评论和展望,或基于他人研究结果的二次开发或更深层次的研究结果报道。

### 4. 综述文章

(1)综述本领域或本学科的研究成果和进展、发展动态和趋势;(2)作者本研究群体的研究工作综述。

### 5. 研究论文

征集研究新结果的学术论文。

### 6. 应用开发类论文

接受各类大学、研究所、企业自主研发的新产品性能报道和新应用报道;新型器件在系统应用结果方面的报道等。这类论文是反映企业研发创新和对自身产品的再认识的能力、并能够让用户更好地了解产品性能、拓展应用范围的手段。本栏目论文具有产品推广广告作用。

### 7. 成果信息和研发信息

本栏目主要为大学、研究所等研发部门发布研究成果信息或项目工程研发信息;企业需要开发或攻关的项目信息等。目的是为研发部门和企业之间架起沟通桥梁。

### 8. 各类形式的企业宣传、广告,具体来电来函商谈,本刊做各类宣传、广告,费用低廉。

“好酒也怕巷子深”——您的产品多一份广告就会多一份收益,低廉的费用可以节约销售人员的出差费用,而效率比高,广告范围广。

在我们这里刊登的广告哪怕只为您带来一个客户——您就收回了广告成本,同时也给您带来了久远的影响和效益。纸版的广告+电子版的广告——更值得客户信赖,更能为您培养潜在的中、远期客户。

网上投稿: E-mail: gjdxxw@gmail.com, xxfw@ciomp.ac.cn

学报地址: 长春市东南湖大路 3888 号 邮编: 130033