

文章编号: 1001-3806(2011)04-0566-04

1 维 3 元非磁化等离子体光子晶体禁带特性研究

章海锋, 蓝鹏飞, 杨国华, 肖正泉

(中国人民解放军炮兵学院 南京分院, 南京 211132)

摘要: 为了研究 1 维 3 元非磁化等离子体光子晶体的禁带特性, 采用传输矩阵法仿真计算了电磁波在 1 维 3 元非磁化等离子体光子晶体的传播规律, 用计算得到的电磁波透射系数讨论了周期常数、介电常数、介质层厚度和等离子体参量对其禁带特性的影响。结果表明, 改变介电常数、介质层厚度和等离子体频率可以实现对带隙的调制, 增加周期数和等离子体频率不能实现对禁带的拓展。这一结果为设计 1 维 3 元非磁化等离子体光子晶体器件提供了理论参考。

关键词: 物理光学; 光子晶体; 等离子体; 传输矩阵法; 禁带

中图分类号: O53 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.04.031

Study on property of prohibited band gaps in 1-D ternary unmagnetized plasma photonic crystals

ZHANG Hai-feng, LAN Peng-fei, YANG Guo-hua, XIAO Zheng-quan

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

Abstract: In order to study property of prohibit band gaps in 1-D ternary unmagnetized plasma photonic crystals, the transfer matrix method was applied to simulate the electromagnetic wave propagation through 1-D ternary unmagnetized plasma photonic crystals. Based on the calculated transmission coefficients, effect of periodic constant, dielectric constant, thickness of dielectric layer and parameter of plasma on the property of prohibited band gaps was analyzed. The results illustrate that the band gaps can be tuned by changing dielectric constant, thickness of dielectric layer and plasma frequency, the bandwidth of prohibited band gaps can not be broadened by increasing periodic and plasma collision frequency. The results are good theoretical references to design 1-D ternary unmagnetized plasma photonic crystal devices.

Key words: physical optics; photonic crystals; plasma; transfer matrix method; prohibit band gap

引言

光子晶体是由折射率不同的介质在空间交迭而形成的一种周期性结构, 最早由 YABLONOVITCH^[1], JOHN^[2] 等提出, 光子晶体因为空间分布的不同可划分为 1 维、2 维和 3 维结构。光波在光子晶体中传播时受到周期性的散射和衍射作用, 使得光子晶体具有一定的光子禁带隙, 即频率落在带隙中的电磁波禁止传播。这个特性使得光子晶体有十分诱人的应用前景^[3-8], 同时也成为了近年来的研究热点。等离子体光子晶体是由 HOJO 等人^[9] 和 LI 等人^[10] 分别独自提出的, 它由等离子体和介质组成。等离子体是一种色散介质, 折射率随入射波的频率变化而变化, 这使得等离子体光子晶体有些特殊的禁带特性^[11-12]。由于等离子体的物理特性可以由外界的磁场、电压、和温度来控制, 所以使得用等离

子体光子晶体来实现可调谐滤波成为可能, 这吸引了国内外众多学者的关注^[13]。等离子体光子晶体拥有众多优点的同时不可避免地也有缺点, 尤其是将其应用于滤波器设计时。要实现单通道或多通道的滤波, 通常的做法是在光子晶体中引入缺陷使得禁带中隧穿出缺陷模, 来实现对特定频率电磁波的导通。但因为等离子体的耗散性特点, 使得缺陷模峰值很低, 尤其是实现多通道滤波时, 过低的透射峰值无法满足多通道滤波的要求。另外一方面, 当等离子体光子晶体要实现带阻滤波的时, 过低的透射峰值和较宽的带宽成为了很难解决的矛盾。为了解决以上述的问题, 3 元光子晶体结构是很好的选择。3 元光子晶体结构有很多优点, 国内很多学者在此方面做了大量的研究工作^[14-15], 指出相对于 2 元光子晶体而言, 3 元光子晶体有更宽的带宽和更好的可调谐性。因此, 研究 3 元等离子体光子晶体的禁带特性在工程应用方面具有重要的理论意义。

作者在理想情况下对 1 维 3 元非磁化等离子光子晶体进行了研究, 采用传输矩阵法计算了电磁波在其中的传播规律。通过计算电磁波的透射系数来获得其

作者简介: 章海锋 (1978-), 男, 讲师, 研究方向为计算电磁学、等离子体物理、微波毫米波天线。

E-mail: hanlor@163.com

收稿日期: 2010-07-24; 收到修改稿日期: 2010-08-20

禁带结构。并讨论了周期常数、介电常数、介质层厚度和等离子体参量对其禁带特性的影响。

1 计算方法与模型

一般计算光子晶体禁带的方法主要有平面波展开法、时域有限差分法和传输矩阵法^[16]。传输矩阵法特别适合1维膜结构的计算,计算效率高、准确、而且程序编制简单。图1中给出了用于计算的1维3元非

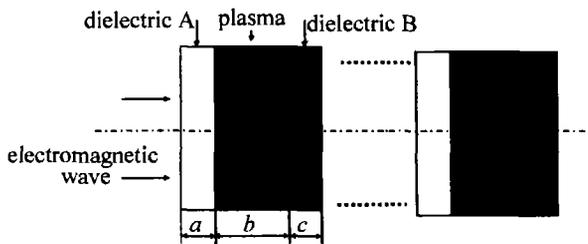


Fig. 1 Physical model of simulation

磁化等离子体光子晶体的物理模型。光子晶体单元由3种介质(介质A、介质B和等离子体)组成,它们周期性地分布在水平方向。介质A的相对介电常数为 $\epsilon_1 = 8$,厚度为 $a = 4\text{mm}$ 。介质B的相对介电常数为 $\epsilon_2 = 4$,厚度为 $c = 4\text{mm}$ 。等离子体介质厚度为 $b = 8\text{mm}$,等离子体频率 $\omega_p = 10\pi \times 10^9 \text{rad/s}$,等离子体碰撞频率 $\nu = 4\pi \times 10^9 \text{rad/s}$,等离子体光子晶体的周期常数为 $N = 11$ 。

由传输矩阵理论可知,当电磁波在多层介质中传播时,其特征矩阵可以表示为:

$$M_k = \begin{bmatrix} \cos\delta_k & -\frac{i}{p_k}\sin\delta_k \\ -ip_k\sin\delta_k & \cos\delta_k \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中:

$$\begin{cases} \delta_k = \frac{2\pi}{\lambda} n_k d_k \cos\theta_k \\ p_k = \begin{cases} n_k \cos\theta_k, & (\text{TE波}) \\ \frac{\cos\theta_k}{n_k}, & (\text{TM波}) \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中, n_k 介质层的折射率, d_k 是介质层的厚度, θ_k 是入射角度,作者仅考虑TE波垂直入射,即 $\theta_k = 0^\circ$ 的情况,TM波入射求解可以依此类推。那么光子晶体周期单元的传输矩阵可以表示为:

$$M_{\text{cell}} = M_A M_p M_B \quad (3)$$

整个光子晶体的传输矩阵则表示为:

$$M = (M_A M_p M_B)^N = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (4)$$

则透射系数 T 为:

$$T = \frac{2n_0}{(M_{11} + M_{12}n_0)n_0 + (M_{21} + M_{22}n_0)} \quad (5)$$

式中, n_0 为空气的折射率,而等离子体的相对介电常数可以表示为:

$$\epsilon_p = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - j\nu)} \quad (6)$$

综合(1)式~(6)式,透射系数 T 可以表示为入射频率的函数,所以据此可以得到光子晶体的禁带特性。下面就以周期常数、介电常数、介质层厚度和等离子体参量为参量来分析对禁带特性的影响。

2 周期常数对禁带特性的影响

图2中给出了周期常数 $N = 1 \sim 60$ 与透射系数的

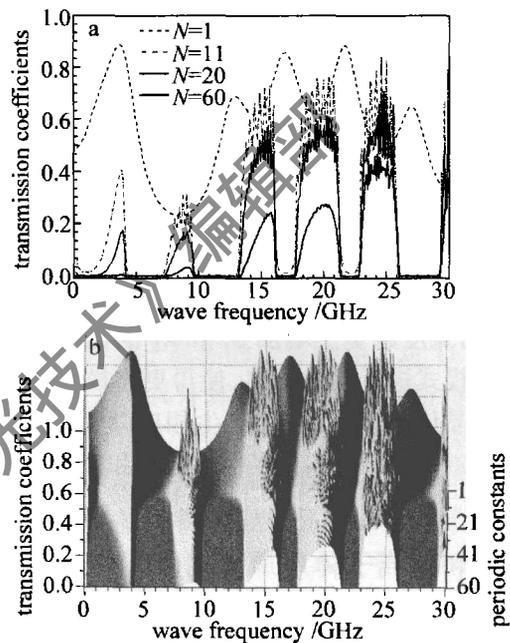


Fig. 2 Transmission coefficients versus frequency as $N = 1 \sim 60$

关系,由图2可知,由一个周期单元组成的1维3元非磁化等离子体光子晶体不能形成明显的禁带结构,随着周期常数 N 的增大,禁带结构将逐渐明显,一味地增加周期常数 N 不会改禁带的带宽,只会对透射系数峰值造成影响。周期数越大,透射系数峰值越小。这是因为等离子体是一种耗散性介质,电磁波在其中传播时电磁能会被等离子体吸收而转换成为等离子体的内能, N 越大意味着等离子体对入射波能量的吸收越大,透射系数峰值自然明显减小。所以,周期常数 N 对禁带带宽无影响,只会对透射峰值的大小造成影响,很少的几个周期就能实现明显的禁带结构,这使得将此类等离子体光子晶体制成小型化微波器件成为了可能。

3 介质层介电常数对禁带特性的影响

为了研究介质层介电常量对禁带特性的影响,引入参量 F (归一化常数),且 $F = \epsilon_2/\epsilon_1$, $\epsilon_1 = 8$,用 ϵ_1 进行归一化处理。图3中给出了参量 F 与透射系数的关系,由图3可知,介质B和介质A的介电常数比值 F

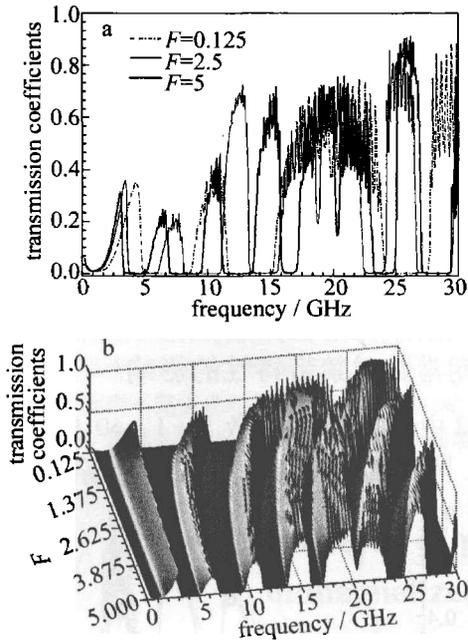


Fig. 3 Transmission coefficients versus frequency as $F = 0.125 \sim 5$

越大,禁带的数目越多,禁带宽度越窄,禁带的中心频率向低频方向移动。反之,常数 F 越小,禁带的数目越少,禁带宽度越宽。增加 ϵ_2 和 ϵ_1 的比值实质上是对入射波模式进行有效分离,使得更多模式的电磁波能在光子晶体中发生谐振,产生相应禁带。这使得1维3元非磁化光子晶体在多信道通信和多信道滤波上有广泛的应用前景。

4 介质和等离子体层厚度对禁带特性的影响

为了研究介质层厚度对禁带的影响,引入参量 K 并以介质层 A 的厚度进行归一化, $K = c/a$, 其中 $a = 4\text{mm}$ 。图4中给出了参量 K 与透射系数的关系,由图4可知,常数 K 越大,即相应介质 B 的厚度越大,禁带

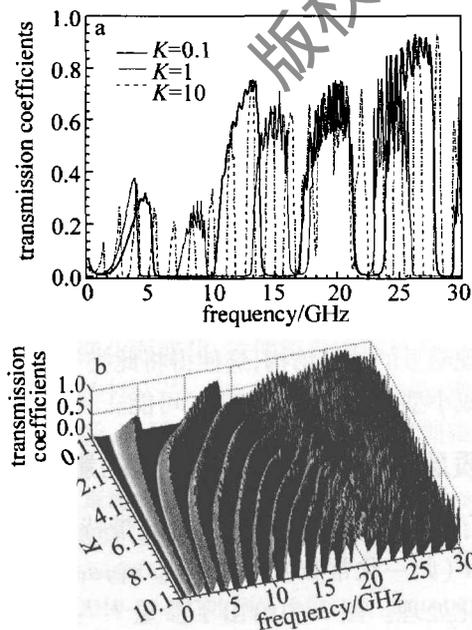


Fig. 4 Transmission coefficients versus frequency as $K = 0.1 \sim 10$

带宽越窄,禁带的中心频率向低频方向移动,禁带的数目越多。反之,常数 K 越小,即介质层的厚度越小,禁带带宽越宽,禁带的数目越小。同样为了研究等离子体层厚度对禁带的影响,引入参量 Q , 以所有介质层厚度 ($a+c$) 进行归一化, $Q = b/(a+c)$, 其中 $a+c = 8\text{mm}$ 。

图5中给出了参量 Q 与透射系数的关系,由图5

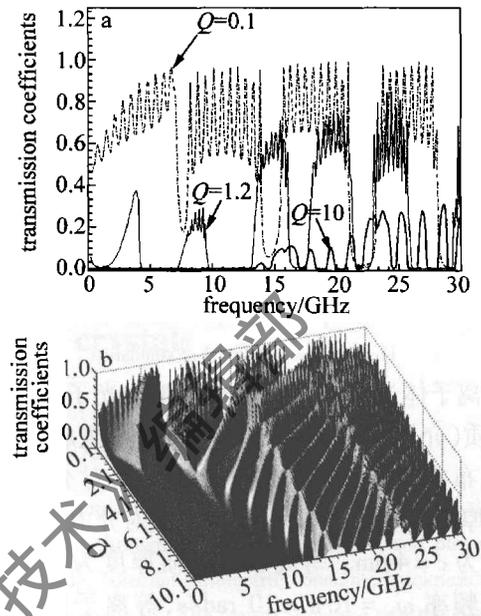


Fig. 5 Transmission coefficients versus frequency as $Q = 0.1 \sim 10$

可知,等离子体层的厚度对禁带宽度影响明显,等离子体层厚度越大,禁带带宽将逐渐增宽,低频部分的禁带将逐渐消失,光子晶体呈现高通滤波特性,在高频部分,出现带宽较窄的禁带,禁带数目增加。透射系数峰值逐渐减小。增加介质层和等离子体层的厚度实质上是增加了电磁波的谐振长度,使电磁波被分离出的模式能够得到充分的谐振,从而使得电磁波因为反射和衍射作用而汇聚电磁能量而隧穿光子晶体,形成更多的光子禁带。而增加等离子体层因为等离子体的耗散特性,会使得等离子体对电磁波的衰减作用增加,同时等离子体本身又有高通滤波的特性,当入射波频率较低的时候,会被等离子体层完全反射。所以只有入射波频率较低,等离子体层较薄时,低频部分才会出现通带。如图5所示, $Q = 10$ 时,低频部分因为等离子体层的反射和吸收作用使得电磁波不能隧穿光子晶体,呈现完全禁止带。综上所述,改变介质层和等离子体层的厚度可以实现对禁带的调谐。

5 等离子体参量对禁带特性的影响

图6中给出了 $\omega_p = 1\text{GHz} \sim 30\text{GHz}$ 与透射系数的关系,由图6可知,改变等离子体的频率可以实现对禁带的拓展,等离子体频率越高禁带的宽度越宽,禁带中心频率向高频方向移动。透射峰值会随着等离子体频

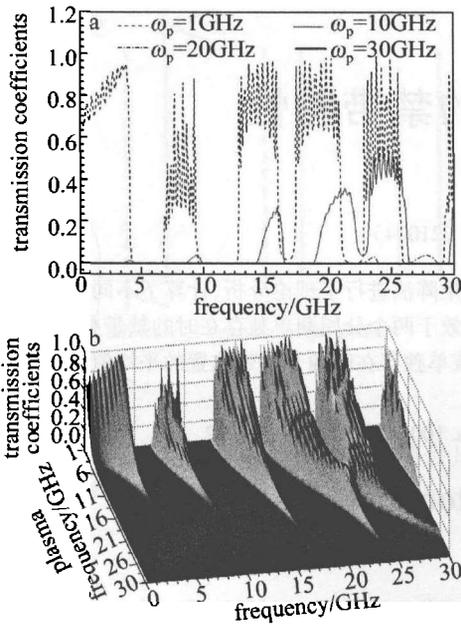


Fig. 6 Transmission coefficients versus frequency as $\omega_p = (1 \sim 30)$ GHz

的增大而减小。透射系数峰值在衰减的过程中存在着一个陡然下降的过程,当等离子体远大于入射波频率时,透射系数峰值衰减到近乎为0,此时表现为对入射电磁波的完全截止。如图6所示, $\omega_p = 30$ GHz时,此时光子禁带为完全截止带。这主要是因为等离子体频率越大其实质上是等离子体的电子密度大,那么能被电磁波极化的电子也越多,等离子体对电磁波的吸收也相应越强。而另外一方面,等离子体对电磁波的吸收主要包含共振吸收和碰撞吸收,当入射电磁波的频率靠近截止区^[17]时,使得等离子体对入射波吸收是共振吸收。而入射电磁波频率远离截止区时,此时等离子体对入射比的吸收是碰撞吸收,共振吸收远大于碰撞吸收。所以透射系数峰值存在陡然下降的过程。

图7中给出了 $\nu = 0.1$ GHz~80.1GHz与透射系数的关系,由图7可知,改变等离子体碰撞频率几乎不能改变禁带的宽度实现禁带的拓展,只会对透射系数峰值造成影响,等离子体碰撞频率越大透射系数峰值是先明显减小然后再逐渐增大最后趋于一个定值。这主要因为等离子体碰撞频率越大,等离子体中的电子还没有完全被入射电磁波极化完全就和中性离子发生碰撞进行能量交换,这实质上是吸波能力降低了,直接表现为透射系数峰值在等离子体碰撞频率很大时,再增加等离子体频率,透射系数峰值几乎保持不变。如图7所示, $\nu = 70.1$ GHz和 $\nu = 80.1$ GHz时禁带宽度和透射系数峰值几乎完全相等。

综上所述,改变等离子体频率可以实现禁带宽度和透射系数峰值的调整,增加等离子体频率不能实现对禁带的拓展,仅能改变透射系数峰值的大小。

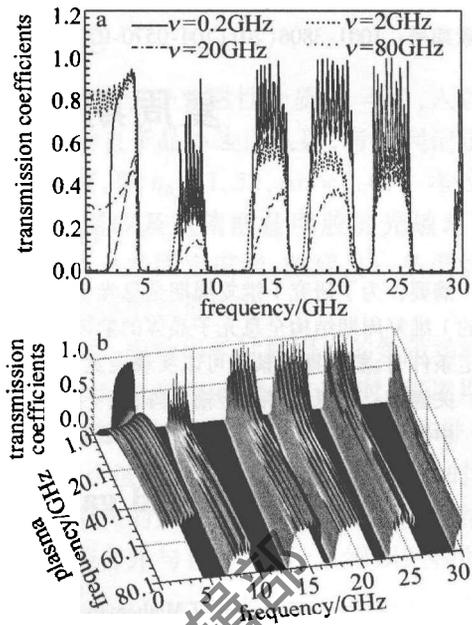


Fig. 7 Transmission coefficients versus frequency as $\nu = (0.1 \sim 80.1)$ GHz

6 结论

在理想情况下,采用传输矩阵法研究了1维3元磁化等离子体光子晶体的禁带特性。对TE波在其中的传播进行了仿真计算。用仿真计算所得的周期常数、介电常数、介质层厚度和等离子体参量对其禁带特性的影响。结果表明,增加周期常数和等离子体碰撞频率不能实现对禁带的拓展,只能影响透射系数峰值。改变介质层的厚度和介电常数不仅可以实现对禁带数目的改变,而且也可以对禁带宽度本身进行调谐。改变等离子体频率可以同时实现对禁带宽度和透射系数调制。上述分析表明,影响时变等离子体光子晶体禁带宽度的决定性因素是等离子体频率、介质层厚度和介电常数,而不是等离子体碰撞频率和周期常数。所以,可合理选择以上参量来设计1维3元非磁化等离子体光子晶体器件。

参 考 文 献

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(20): 2059-206.
- [2] JOHN S. Localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [3] MEI L Q, YE W M, ZEN C. Characteristic properties of transmission research of 2-D photonic crystals using the transfer matrix method (TMM)[J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2003, 9(2): 88-92 (in Chinese).
- [4] OUYANG Zh B, AN H N, RUAN S C, *et al.* Promoting the coupling efficiency of waves by a 2-D photonic crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(1): 69-72 (in Chinese).
- [5] WU W Q, CHEN X W, ZHOU H, *et al.* Investigation of the ultraflat-tened dispersion in photonic crystal fibers with hybrid cores[J]. *Acta*

进一步计算了保持一个制作波长为 457nm、改变另一个制作波长的展宽禁带,研究复周期结构禁带的

中心位置,结果见表 1,发现展宽后的禁带中心和分周期结构禁带单独存在时的禁带中心的平均值一致。

Table 1 Positions of band gaps of single periodic and biperiodic photonic crystal

wavelength/nm	gap position/nm	meanvalue of the gaps of two single wavelength/nm		gap position of the biperiodic structure/nm	
445	472.0	445 ~ 457	478.3	445 ~ 457	478.3
450	477.3	450 ~ 457	480.9	450 ~ 457	481.0
457	484.5	457 ~ 457	484.5	457 ~ 457	484.5
460	487.8	460 ~ 457	486.2	460 ~ 457	486.0
465	493.0	465 ~ 457	488.8	465 ~ 457	490.0
470	498.3	470 ~ 457	491.4	470 ~ 457	492.0

4 结论

对于 1 维复周期结构的全息光子晶体进行了编程计算,发现用两种波长进行二次曝光制作的晶体内部有禁带,但只有满足一定波长关系才能实现禁带展宽,否则禁带只是简单叠加。展宽后的禁带位置是两个单周期结构时禁带位置的平均值。这就对所开展的相关复周期全息光子晶体的实验工作提供了指导。

参考文献

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [2] YABLONOVITCH E, GMITTER T J. Photonic band structure the face centered cubic case [J]. Physical Review Letters, 1989, 63(18): 1950-1953.
- [3] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. Physical Review Letters, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [4] YE Zh Ch, ZHENG J, WANG X D, *et al.* Analysis for characteristics of the photonic band gap structures in volume hologram[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(5): 517-521 (in Chinese).
- [5] LI R, CHENG Y, CUI L B, *et al.* Effect of number of unit cells of fcc photonic crystal on property of band gap [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(1): 188-191 (in Chinese).
- [6] CHENG Y, ZHOU X K. Analysis of the transmission spectrum of one dimensional holographic photonic crystal [J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2007, 13(4): 300-303 (in Chinese).
- [7] WANG HUI, LI Y P. An eigen matrix method for obtaining the band structure of photonic crystals [J]. Acta Physica Sinica, 2001, 50(11): 2172-2178 (in Chinese).
- [8] HE X J, XIE K, XIANG A P, *et al.* Research of band gap of 1-D photonic crystals [J]. Laser Technology, 2008, 32(5): 508-509 (in Chinese).
- [9] CUI L B, WANG F, WANG J, *et al.* The rule for broadening of band gaps in biperiodic photonic crystals [J]. Physics Letters, 2004, A324(5/6): 489-493.
- [10] LI Y, ZHRNG R S, FENG Y C, *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 (in Chinese).
- [11] LIU Q N. Effect of absorption of dopant on design of photonic crystal filters [J]. Laser Technology, 2008, 32(3): 327-329 (in Chinese).
- [12] LIU Q N. The design of double channel polarization tunable filter of photonic crystal [J]. Laser Technology, 2008, 32(1): 84-87 (in Chinese).
- [13] HOJO H, MASE A. Dispersion relation of electromagnetic wave in one-dimensional plasma photonic crystals [J]. Journal of Plasma and Fusion Research, 2004, 80(2): 89-92.
- [14] LI W, ZHANG H T, GONG M L, *et al.* Plasma photonics crystal [J]. Optical Technique, 2004, 30(3): 263-266 (in Chinese).
- [15] ZHANG H F, MA L, LIU Sh B. Defect mode properties of magnetized plasma photonic crystals [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(2): 1071-1076 (in Chinese).
- [16] LIU Sh B, MO J J, YUAN N C. FDTD simulation for magnetized plasma photonic crystals [J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(6): 2804-2808 (in Chinese).
- [17] ZHANG H F, MA L, LIU Sh B. Effect of temperature and density on characteristics of prohibit band gap in magnetized plasma photonic crystals [J]. Laser Technology, 2009, 33(4): 393-396 (in Chinese).
- [18] NING X F, RONG C C, YAN K Z. The effect of refractive index to the band gap of 1-D threeelement photonic crystals [J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2006, 12(1): 53-57 (in Chinese).
- [19] CHEN H B, GAO Y J, HAN J T. Effect of optical thickness on characteristics of photonic forbidden band of 1-D three element photonic crystal [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(11): 2210-2212 (in Chinese).
- [20] WANG H, LI Y P. An eigen matrix method for obtaining the band structure of photonic crystals [J]. Acta Physica Sinica, 2001, 50(1): 2172-2178 (in Chinese).
- [21] ZHUANG Z W, YUAN N C, LIU S B, *et al.* Plasma stealth technology [M]. Beijing: Science Press, 2005: 117-119 (in Chinese).

(上接第 569 页)

Photonica Sinica, 2006, 35(1): 109-113 (in Chinese).