

等离子体填充二维金属光子晶体色散特性研究

傅 涛¹, 杨梓强¹, 史宗君¹, 兰 峰¹, 高 喜²

(1. 电子科技大学物理电子学院, 四川成都 610054; 2. 桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西桂林 541004)

摘 要: 提出了等离子体填充的二维金属光子晶体模型, 采用时域有限差分法研究了等离子体填充的二维正方晶格和三角晶格金属光子晶体的色散和带隙特性. 对比分析了两种结构中等离子体密度对 TM 及 TE 模式传播特性的影响规律. 研究发现, 由于背景等离子体的引入, 二维金属光子晶体的色散曲线明显往高频方向移动, 等离子体密度的改变可同时控制 TE 和 TM 模的带隙位置和禁带宽度. 这些特性使得二维等离子体金属光子晶体在设计可调谐光子晶体器件方面具有潜在的应用价值.

关键词: 二维金属光子晶体; 等离子体; 光子带隙; 色散特性

中图分类号: O441.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012)03-0538-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.03.021

Dispersion Property of Plasma Filled 2-D Metallic Photonic Crystal

FU Tao¹, YANG Zi-qiang¹, SHI Zong-jun¹, LAN Feng¹, GAO Xi²

(1. Department of Physics Electronics, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China;

2. Information and Communication College, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: Dispersion characteristics of square and triangular metallic photonic crystals filling with plasma are investigated by finite difference time domain (FDTD) method. Effects on TM and TE modes in the two-structures with the variation of plasma density are analyzed. The results show that the dispersion curves of 2-D metallic photonic crystal filling with plasma upshift to the higher frequency. The width and location of bandgap of TM and TE modes can be controlled by the density of plasma. These properties of the 2-D Metallic Photonic crystal with background are potentially valuable in the aspect of designing tunable photonic crystal device.

Key words: 2-D metallic photonic crystal; plasma; photonic bandgap; dispersion property

1 引言

等离子体光子晶体是等离子体和光子晶体两个学科交叉的产物, 它不仅具有一般光子晶体的带隙特性和局域特性^[1~3], 而且还体现着等离子体的物理特性. 2004 年 H. Hojo 等^[4]提出由等离子体和介质层交替构成的一维等离子体光子晶体, 研究发现等离子体光子晶体具有与普通光子晶体类似的能带特性, 其带隙宽度受等离子体密度的调制. 随后人们对二维等离子体介质光子晶体结构能带特性进行了较多的研究工作. O. Sakai 等^[5]通过实验验证了在二维等离子体光子晶体中可以形成稳定的光子带隙结构; 刘少斌等^[6~10]研究了多种有限时域差分法 (FDTD) 方法在等离子体二维介质光子晶体数值计算的应用; 章海峰等^[11]计算了温度、密度对

非磁化介质光子晶体色散禁带特性的影响, 为可调谐禁带等离子体光子晶体的实现提供了理论依据; 亓丽梅等研究了二维非磁化等离子体介质光子晶体的色散特性^[12]并用改进的 FDTD 方法计算了其传输特性.

二维金属光子带隙结构, 具有许多独特的优越性, 受到了人们的高度关注. 近年来研究发现, 金属光子晶体在解决电真空器件的模式竞争^[13,14], 以及微波毫米波及其 THz 频段滤波器件等方面有着重要的应用价值^[15~17]. 结合等离子体介质光子晶体带隙宽度受等离子体密度控制特点, 本文提出等离子体填充的二维金属柱光子晶体模型, 研究了等离子体密度对二维正方晶格和三角晶格金属光子晶体色散特性和带隙特性的影响, 其计算结果为研究可调谐金属光子晶体器件提供了依据.

2 理论模型和 FDTD 算法

光子晶体根据晶格排列方式的不同分为很多种晶格结构,而正方晶格和三角晶格是两种典型的晶格结构.图 1 给出了正方晶格排列和三角晶格排列的二维等离子体金属光子晶体模型,背景填充等离子体,圆柱代表属性为理想导体的金属,晶格常数和金属柱半径分别为 a 和 r .图 1(a)给出正方晶格结构物理模型以及其不可约布里渊区,其中 Γ 、 X 和 M 分别为波矢值 $\mathbf{k} = (0, 0)$, $(\pi/a, 0)$ 和 $(\pi/a, \pi/a)$ 和.图 1(b)给出了三角晶格物理模型以及其不可约布里渊区,其中 Γ 、 J 、 M 分别对应点 $\mathbf{k} = (0, 0)$, $(0, 2\pi/\sqrt{3}a)$ 和 $(2\pi/\sqrt{3}a, 2\pi/\sqrt{3}a)$.图 1 中虚线框对应光子晶体晶格结构中的周期单元.

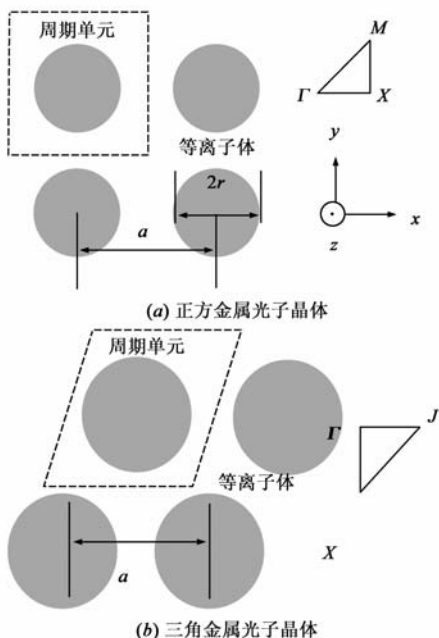


图1 等离子体金属光子晶体物理模型

利用弗洛奎周期^[18]边界条件,将二维无限周期结构系统缩减到一个周期单元(如图 1 中虚线框所示),采用时域有限差分法(FDTD)分析上述等离子体填充二维金属光子晶体其中的一个周期单元即可求解总电磁场^[19].其中等离子体的贡献以电流源的形式引入到真空形式的麦克斯韦方程中,高频电场在等离子体中激发出随时间变化的电流密度可表述为:

$$\frac{d\mathbf{J}}{dt} + \nu\mathbf{J} = \epsilon_0\omega_p^2\mathbf{E} \quad (1)$$

由式(1)的等离子体流体方程与 Maxwell 方程组加上周期边界条件即可求解.其中, \mathbf{J} 为等离子体电流密度, ω_p 为等离子体归一化频率, ν 为等离子体碰撞频率(本文为稀薄等离子体,忽略不计).

上述结构中,由于金属柱设为理想导电介质,所以电磁波可分为电场平行于金属柱的 TM 模 $\mathbf{H} = (H_x,$

$H_y, 0)$ 、 $\mathbf{E} = (0, 0, E_z)$ 和电场垂直于金属柱的 TE 模 ($\mathbf{E} = (E_x, E_y, 0)$ 、 $\mathbf{H} = (0, 0, H_z)$).式(2)、(3)给出了等离子体金属光子晶体 TM 模式 H_x 、 E_z 分量的场方程:

$$\mu_0 \frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} - jk_z E_y + jk_y E_z \quad (2)$$

$$\epsilon_0 \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - jk_x H_y + jk_y H_x - J_z \quad (3)$$

同理,可以得到其他方向场方程表达式.将麦克斯韦场方程根据 Yee 网格^[20]进行差分迭代即可求出各场空间分布,然后根据傅立叶变换到频域.分析不同波矢量时频域特性即可得到等离子体金属光子晶体色散特性曲线.

3 色散特性的结果分析

利用上述 FDTD 方法,通过数值计算研究了背景等离子体对正方晶格和三角晶格中 TM 和 TE 模色散及带隙特性的影响.数值计算中取 $a = 1\text{ cm}$, $r = 0.2\text{ cm}$.

3.1 背景等离子体对正方晶格金属光子晶体色散特性的影响

3.1.1 TM 模式

首先分析了等离子体对二维正方晶格金属光子晶体中 TM 模色散特性的影响.图 2 给出了等离子体归一化频率为 $\omega_p a / 2\pi c = 0.5$ (对应等离子体密度为 $n_e = \omega_p^2 m_0 \epsilon_0 / e^2 = 2.7918 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$) 时,用 FDTD 方法得到的正方晶格结构 TM 模色散曲线.同时,为便于比较,图中实心点和空心点分别代表有、无等离子体填充正方晶格结构色散曲线.横坐标沿波矢 $\Gamma-X-M-\Gamma$ 方向,纵坐标代表电磁波归一化频率 $\omega a / 2\pi c$.从图 2 中比较可知,对于二维金属光子晶体,引入填充等离子体后,其 TM 色散曲线明显上移,其第一条禁带归一化频率由 $\omega a / 2\pi c = 0.534$ 上升到 0.703.第二条带隙的宽度范围从 $\omega a / 2\pi c = (0.650, 0.729)$ 变化到 $(0.877, 0.967)$,其相对带隙宽度 $\omega_g = \Delta\omega / \omega_R$ ($\Delta\omega$, ω_R 分别为带隙宽度和带隙的中心位置)由 0.153 减小为 0.096,因此,等离子体的引入使 TM 模的第二条全局禁带相对带隙宽度减小.

图 3 给出了等离子体密度对二维等离子体金属光子晶体第一、二全局禁带归一化频率和带隙宽度的影响.实心圆点和空心圆点分别代表其第一禁带上频率点和第二带隙位置.图 3 表明,随着等离子体密度增加,

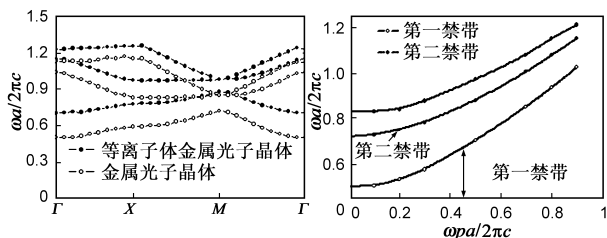


图2 正方晶格TM模色散曲线

图3 等离子体密度对全局带隙的影响

金属光子晶体全局禁带频率随之上升.

第一禁带的截止频率随等离子体密度的增加几乎呈线性上升;第二禁带的上下截止频率随等离子体密度的增加不断上移,但是禁带宽度却逐步变窄.实际上当电磁波在等离子体中传播时其色散特性表现为^[21]: $\omega^2 = \omega_p^2 + (ck)^2$, 当入射波的频率接近等离子体频率时发生较强的色散,当入射波的频率较高,即波长较短时,等离子体对入射波的影响逐步减弱.因此在具有背景等离子体的光子晶体中,随等离子体密度的增加,第二禁带的上截止频率点上移的速度小于下截止频率,导致禁带宽度的逐步变窄.

3.1.2 TE 模式

图4给出了有、无等离子体填充的二维金属光子晶体 TE 模的色散曲线.其中,等离子体归一化频率为 $\omega_p a / 2\pi c = 0.5$.由图4可知,等离子体的引入使得二维金属光子晶体 TE 模色散曲线整体上移,归一化截止频率 0.5 以下出现全局禁带.对于 X 点局域带隙,第一条局域带隙归一化频率范围从 (0, 0.4074) 上升到 (0, 0.6453), 第二条局域带隙从 (0.5421, 1.001) 上升到 (0.7377, 1.168), 相对带隙宽度 ω_g 由 0.5948 减小到 0.5716. 对应 M 点局域带隙,除第一归一化截止频点从 0.5928 变化到 0.7713 附近,第二带隙位置从归一化频率 $\omega a / 2\pi c = (0.5987, 0.696)$ 变化到 (0.8034, 0.8565), 相对带隙宽度 $\omega_g = \Delta\omega / \omega_R$ 由 0.1503 变为 0.06398.

图5给出了等离子体密度变化对 X 和 M 点带隙的影响,其中空心圆和实心圆分别代表有、未填充等离子体色散曲线.可见,随着等离子体密度的增大, X 和 M 点的带隙均往高频方向移动,带隙宽度逐步减小.因此,可以通过调节等离子体密度控制 TE 模局域带隙的位置和宽度.

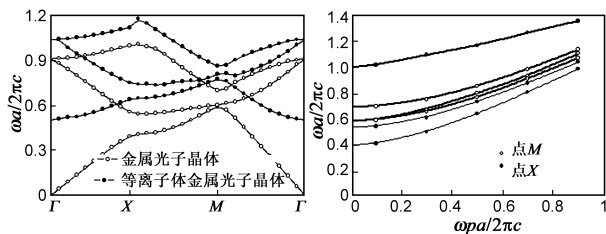


图4 正方晶格TE模式色散曲线 图5 等离子体密度对TE模X和M点处局域带隙的影响

3.2 背景等离子体对三角晶格金属光子晶体色散特性的影响

对于二维三角形金属光子晶体,金属柱的半径和晶格常数保持不变,背景等离子体归一化频率为 $\omega_p a / 2\pi c = 0.5$.

3.2.1 TM 模式

图6给出了三角晶格结构金属光子晶体中 TM 模的色散曲线,其中,实心圆和空心圆分别对应无、有等离

子体情况.填充背景填充等离子体后,三角晶格金属光子晶体中 TM 色散曲线明显上移,第一禁带宽度从 0.616 增加到 0.7905. 第二条带隙的归一化中心频率从 1.17 上升到 1.26, 相对带隙宽度 ω_g 未发生明显变化. 图7为等离子体密度变化对金属光子晶体全局禁带的影响,随着等离子体密度增加,金属光子晶体全局禁带频率随之上升,第一禁带宽度快速增加,但是第二禁带宽度逐步减小,随后消失.

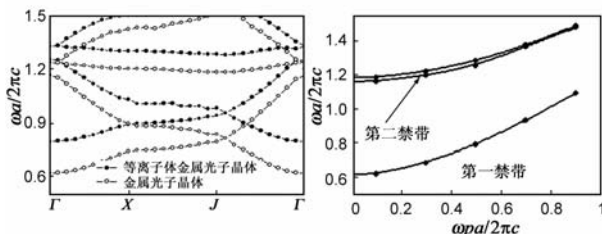


图6 三角晶格TM特性曲线 图7 等离子体密度对全局带隙的影响

3.2.2 TE 模式

图8给出了有、无等离子体情况下三角晶格结构金属光子晶体 TE 模的色散曲线.比较图4和图8可以看出,等离子体填充后,三角和正方晶格结构具有基本相同的变化规律,即色散曲线整体上移,并在等离子体截止频率点下出现一条禁带.图9给出了等离子体密度对三角晶格局部禁带点 X, J 处禁带特性的影响,随等离子体密度增加局域禁带宽度不断减小.其中,由于 J 点第一、二曲线重合,使图9中 J 点曲线只有两条.

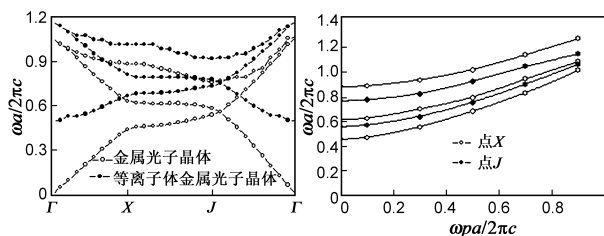


图8 三角晶格TE模色散曲线 图9 等离子体密度对X、J局域带隙的影响

4 结束语

本文采用时域有限差分方法分析了等离子体填充的两种结构的二维等离子体金属柱光子晶体的色散特性和带隙特性.研究表明,等离子体的引入,色散曲线整体上移,TE 模式在等离子体截止频率以下形成了新带隙;随着等离子体密度增加,无论是 TM 还是 TE 模式,其第一条带隙宽度不断往高频方向拓展, TM 模的第二条带隙及 TE 模的局域禁带宽度不断减小,甚至消失.具有背景等离子体的二维金属光子晶体中色散特性的变化规律表明可通过控制等离子体密度实现带隙宽度调节,这些特性为进一步制作可调谐光子晶体器件提供了理论依据.

参考文献

- [1] 柏宁丰, 孙小涵. 基于耦合边界的紧凑型光子晶体定向耦合器的优化设计[J]. 电子学报, 2007, 35(2): 220 – 223.
BAI Ning-feng, SUN Xiao-han. Optimum design on compact photonic crystal waveguide directional coupler based on adiabatic coupling[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(2): 220 – 223. (in Chinese)
- [2] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Physical Review Letters, 1987, 58(20): 2059 – 2062.
- [3] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super-lattices [J]. Physical Review Letters, 1987, 58(23): 2486 – 2489.
- [4] Hojo H and Mase A. Dispersion relation of electromagnetic waves in one-dimensional plasma photonic crystals [J]. PlasmaFusion Research, 2004, 80(2): 89 – 90.
- [5] Sakai O, Sakaguchi T, et al. Verification of a plasma photonic crystal for microwaves of millimeter wavelength range using two-dimensional array of columnar microplasmas [J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(24): 241505 – 1 – 241505 – 3.
- [6] 刘少斌, 朱传喜, 等. 等离子体光子晶体的 FDTD 分析[J]. 物理学报, 2005, 54(6): 2804 – 2808.
LIU Shao-bin, ZHU Chuan-xi, et al. FDTD simulation for plasma photonic crystals [J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(6): 2804 – 2808. (in Chinese)
- [7] 徐利军, 刘少斌, 等. 等离子体中的 PLCDRC-ADI-FDTD 方法[J]. 电子学报, 2006, 34(3): 483 – 486.
XU Li-jun, LIU Shao-bin, et al. PLCDRC-ADI-FDTD method in isotropic plasma [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(3): 483 – 486. (in Chinese)
- [8] 刘少斌, 莫锦军, 等. 电磁波在不均匀磁化等离子体中的吸收[J]. 电子学报, 2003, 31(3): 1 – 4.
LIU Shao-bin, MO Jin-jun, et al. Research on the absorption of EM-wave by inhomogeneous magnetized plasma [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(3): 1 – 4. (in Chinese)
- [9] 刘少斌, 莫锦军, 等. 等离子体的分段线性电流密度递推卷积 FDTD 算法[J]. 物理学报, 2004, 53(3): 778 – 782.
LIU Shao-bin, MO Jin-jun, et al. A novel FDTD simulation for plasma piecewise linear current density recursive convolution [J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(3): 778 – 782. (in Chinese)
- [10] 刘少斌, 顾长青, 等. 磁化等离子体光子晶体的 FDTD 分析[J]. 物理学报, 2006, 53(3): 1283 – 1288.
LIU Shao-bin, GU Chang-qing, et al. FDTD simulation for magnetized plasma photonic crystals [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 53(3): 1283 – 1288. (in Chinese)
- [11] 章海峰, 马力, 等. 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(理科版), 2006, 31(6): 540 – 545.
ZHANG Hai-feng, MA Li, et al. Effects of plasma temperature and density to the characteristic of band gap structure for unmagnetized plasma photonic crystals [J]. Journal of NanChang University (Natural Science), 2006, 31(6): 540 – 545. (in Chinese)
- [12] QI L M, YANG Z Q, et al. Dispersion characteristics of two-dimensional unmagnetized dielectric plasma photonic crystal [J]. Chinese Physics B, 2010, 19(3): 034210 – 1 – 034210 – 6.
- [13] SMIRNOVA E I, CHEN C, et al. Simulation of photonic band gaps in metal rod lattices for microwave applications [J]. Journal of Applied Physics, 2002, 91(3): 960 – 968.
- [14] SIRIGIRI J R, KREISCHER K E, et al. Photonic-band-gap resonator gyrotron [J]. Physical Review Letters, 86(24): 5628 – 5631
- [15] SMIRNOVA E I, KESAR A S, et al. Demonstration of a 17-GHz, high-gradient accelerator with a photonic-band-gap structure [J]. Physical Review Letters, 2005, 95(7): 074801 – 1 – 074801 – 4.
- [16] BRAND S, ABRAM R A, et al. Complex photonic band structure and effective plasma frequency of a two-dimensional array of metal rods [J]. Physical Review B, 2007, 75(3): 035102 – 1 – 035102 – 7.
- [17] 王华娟, 毕岗, 等. 太赫兹波在金属光子晶体中的传播特性[J]. 微波学报, 2005, 21(1): 31 – 34.
WANG Hua-juan, BI Gang, et al. Characteristic of metallic photonic crystal in THz range [J]. Journal of Microwaves, 2005, 21(1): 31 – 34. (in Chinese)
- [18] Allaire G, Concha C. Bloch wave homogenization and spectral asymptotic analysis [J]. Mathematica Pures Applied, 1998, 77(2): 153 – 208.
- [19] 张克潜, 李德杰. 微波与光电子学中的电磁理论 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2001. 392 – 397.
- [20] 王秉中. 计算电磁学 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. 52 – 56.
- [21] CHEN F F. Introduction to Plasma Physics [M]. Los Angeles: Plenum Press, 1974. 101.

作者简介



傅 涛 男, 1985 年 5 月出生于山东青岛市. 现为电子科技大学物理电子学院光学专业在读博士生. 主要从事光子晶体在 THz 和高功率微波器件中的应用研究.

E-mail: futaosukie@gmail.com

杨梓强 男, 1965 年出生, 湖南人, 博士, 教授, 博士生导师. 主要研究方向为相对论强相干辐射源、等离子体电子学及 THz 电子学、毫米波亚毫米波的准光传输技术等. E-mail: zqyang@163.com