

文章编号: 1001-4322(2009)08-1245-05

共轴环光子晶体的缺陷微腔特性*

刘晓杰¹, 雷虹¹, 余恬¹, 冯进军², 廖复疆²

(1. 山东大学 信息科学与工程学院, 济南 250100;

2. 北京真空电子技术研究所 大功率微波电真空器件技术国防科技重点实验室, 北京 100016)

摘要: 采用数值计算方法,模拟了共轴环光子晶体缺陷微腔的谐振模式场分布,计算了此微腔的品质因数和功率损耗,并分析其几何参数对谐振特性的影响。以此缺陷微腔为基础构建周期性慢波系统,讨论了该系统的色散特性。结果表明,微腔中能够存在单一的谐振模式,微腔的纵向长度和介质环介电常数对谐振特性影响较大。所构建的慢波系统有较宽的慢波频域,且慢波比曲线较为平坦。增大电子注开孔半径和减小周期长度对于提高工作频率及增加带宽较为有效。

关键词: 光子晶体; 缺陷微腔; 功率损耗; 品质因数; 周期性慢波系统; 色散特性

中图分类号: TN252 **文献标志码:** A

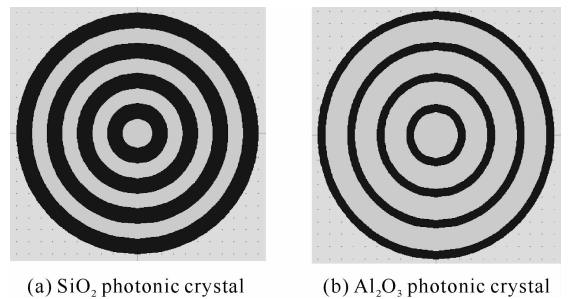
微真空电子器件(μ VED)在现代国防科技和国民经济中具有至关重要的作用。传统的 μ VED 多采用全金属封闭结构,其设计理念与加工技术已相当成熟。随着科技进步和实际需求, μ VED 正逐渐向着大功率、超高频、小型化的方向发展。但随着器件尺寸的减小,直接导致加工困难、功率容量降低和电击穿等问题,且在高频段下工作模式非常复杂,模式振荡极其严重,难以实现单模输出^[1-2]。

光子晶体是近年来出现的一种新型人工材料,将其引入返波振荡器、反射速调管等 μ VED 中,有望解决传统 μ VED 在发展过程中面临的诸多问题^[3-5]。汉城大学 S. G. Jeon 研究组正研制采用光子晶体谐振腔的反射式速调管,以期得到大功率亚毫米波辐射源。结果证实,光子晶体谐振腔在维持稳定的高阶振荡模式、降低损耗等方面比传统的谐振腔有很大优势^[6]。

共轴环光子晶体是由两种介电常数不同的共轴环形介质层沿径向周期排布所构成的圆柱状 1 维光子晶体。这种光子晶体结构简单,设计容易,制作便捷。在共轴环光子晶体中,可以通过改变其中心介质层厚度或中间介质层厚度,构成不同形式的缺陷^[7]。具有某种缺陷的共轴环光子晶体可作为电磁波传输系统,且由于其全介质结构,能够有效降低损耗。本文以具有中心缺陷的共轴环状光子晶体构建圆柱微谐振腔,利用大型电磁场分析软件 MWS 对微腔中谐振模式场分布、品质因数等特征参量进行了数值模拟,得到了单一稳定的类 TM_{010} 谐振模。讨论了腔体纵向长度对功率损耗和品质因数的影响。并以此共轴环光子晶体微腔为基础进一步构建周期性慢波系统,详细讨论了该系统的色散特性。

1 光子带隙和微腔模型

目前光子能带的计算方法主要有平面波展开法(PWEM)、时域有限差分法(FDTD)和转移矩阵法等^[8-9]。本文基于 PWEM 对两种共轴环状 1 维光子晶体进行能带计算。图 1 为这两种光子晶体横截面结构示意图,深黑色圆环代表介质环,介质环以外的区域为真空,相邻的介质环与真空环的径宽之和为晶格常数 a 。图 1(a)中介质为 SiO_2 ,其介电常数为 4,占空比(沿径向介质环与真空环宽度的比值)为 1:1;图 1(b)中的介质为 Al_2O_3 ,其介电常数为 9.9,占空比为 1:3。



(a) SiO_2 photonic crystal

(b) Al_2O_3 photonic crystal

Fig. 1 Cross sections of photonic crystal

图 1 光子晶体横截面图

* 收稿日期:2008-04-14; 修订日期:2009-03-02

基金项目:大功率微波电真空器件技术国防科技重点实验室基金资助课题(514400030204JW2401)

作者简介:刘晓杰(1982—),男,主要从事微波电真空器件基础研究;lxjackie@163.com。

通信作者:雷虹,Leihong99@sdu.edu.cn。

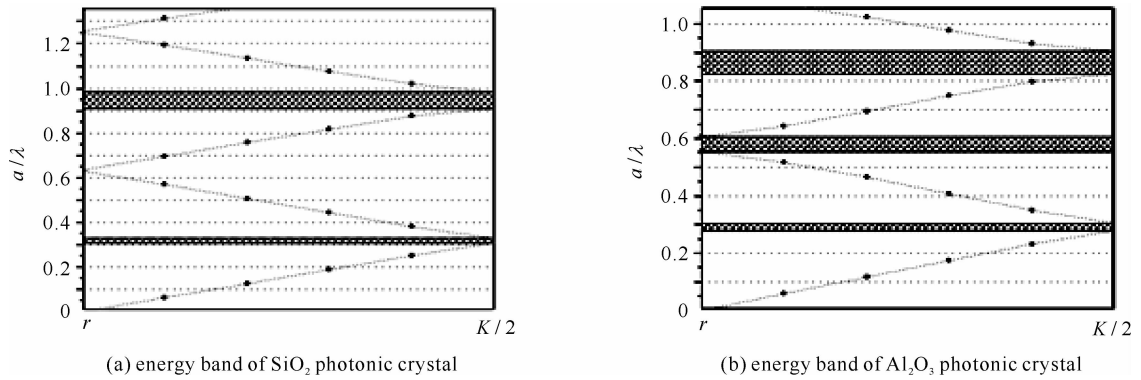


Fig. 2 Energy bands of photonic crystals

图 2 光子晶体的能带

数值计算得到,这两种光子晶体均有多个带隙,其能带如图 2 所示。由于工作频率越高,微腔内模式越复杂,故本文仅考虑最低带隙。由图 2(a)和图 2(b)可见, SiO_2 光子晶体和 Al_2O_3 光子晶体的最低带隙分别为 $0.306 < a/\lambda < 0.329$ 和 $0.278 < a/\lambda < 0.304$ 。这两种光子晶体晶格常数分别取 0.92 mm 和 0.80 mm ,所对应的带隙频率范围分别为 $99.7 \sim 107.3 \text{ GHz}$ 和 $104.3 \sim 114.2 \text{ GHz}$ 。

对于上述的共轴环光子晶体,改变其中心真空孔和第一层介质环的径向宽度便构成一定的缺陷。截取一段纵向长度为 l 、横截面积一定、包含缺陷的共轴环光子晶体,两端以导体平板短路,就构成共轴环光子晶体缺陷微腔,其结构模型如图 3 所示,其中缺陷尺寸分别为 $R_1 = 0.69 \text{ mm}$, $r_1 = 0.69 \text{ mm}$ 和 $R_2 = 0.80 \text{ mm}$, $r_2 = 0.80 \text{ mm}$ 。此微腔工作时,频率落在带隙范围的电磁波将在微腔内产生谐振,而频率处于带隙之外的电磁波则沿微腔的径向泄漏出去。这样可以有效抑制模式之间的竞争,从而在微腔内得到单一的谐振模式^[10]。

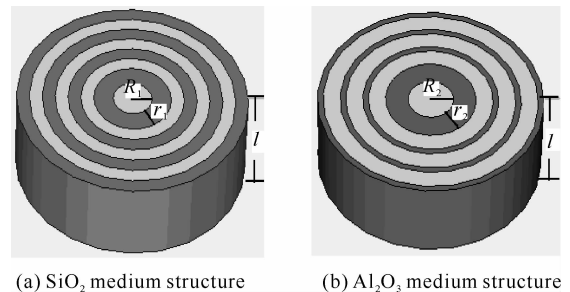


Fig. 3 Scheme of coaxial photonic crystal microcavities

图 3 共轴光子晶体微腔结构示意图

2 谐振模式与谐振特性

利用大型电磁场分析软件 MWS 对上述两种共轴环光子晶体缺陷微腔进行建模和数值仿真。计算中,取 $l = 0.1 \text{ mm}$ 。数值分析结果表明:这两种缺陷微腔内都存在径向限制较好的单一类 TM_{010} 谐振模式,其横向电场分布及谐振频率如图 4 所示。可以看出,场分布主要集中在中心缺陷微腔内。

功率损耗是谐振腔的重要参量之一,本文所讨论光子晶体微腔的损耗主要包括两部分:

(1) 导体损耗。由于腔体上下两端短路导体板的电导率是有限的,其上的表面电流将引起焦耳损耗,这是谐振腔损耗的主要部分。根据电磁场理论,导体表面电流产生的损耗功率为

$$P_1 = \frac{R_s}{2} \int_s \mathbf{H}_t \cdot \mathbf{H}_t^* \text{d}S \quad (1)$$

式中: R_s 是导体表面电阻; H_t 是导体短路板表面的磁场切向分量。

(2) 介质损耗。如图 4 所示,虽然电场被很好地局限在中心微腔内,但腔外介质环内也有微弱的场分布,这将引起介质损耗。品质因数是表征谐振特性的重要参量,它表示腔体储能与功率损耗之间的关系,反映了谐振腔的选频特性,其定义为

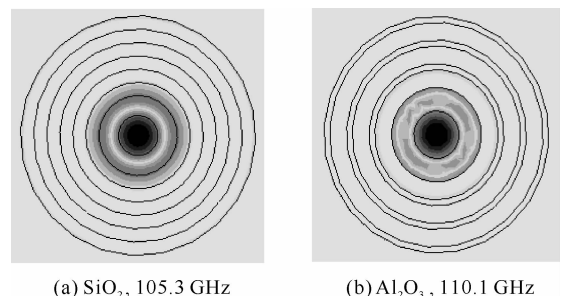


Fig. 4 Field patterns of resonant modes

图 4 谐振模式的电场横向分布

$$Q = \omega_0 \frac{W}{P_1} \quad (2)$$

式中： W 是腔内电磁场能量； ω_0 是谐振频率。

对于共轴环光子晶体缺陷微腔，由于其结构和边界条件都相当复杂，目前尚无准确的理论公式分析其品质因数和功率损耗。本文借助 MWS 软件中的本征模求解器，数值计算该种类型微腔的品质因数和功率损耗。计算中，腔体两端的短路金属板均为金属紫铜，其电导率为 5.8×10^7 S/m。

图 5 给出了不同腔体纵向长度下的微腔功率损耗和品质因数。由图可见，随微腔纵向长度的增加，功率损耗不断减小，且纵向长度较小时损耗曲线下降很快，随着纵向长度增加，曲线趋于平坦；品质因数则随腔体纵向长度的增加而迅速增大。这是因为随纵向长度增加，导体表面电流减小，导致导体损耗降低；同时，微腔体积的增大，使得腔内储能增加。在腔体纵向长度相同的情况下， Al_2O_3 共轴环光子晶体环微腔比 SiO_2 共轴光子晶体微腔具有更低的功率损耗和更高的品质因数，且随着腔体纵向长度增加，前者的品质因数直线上升。可见，介质环介电常数增大，有利于降低损耗和提高品质因数。这主要是由于介电常数增大时，微腔中电场纵向分量增大所致。

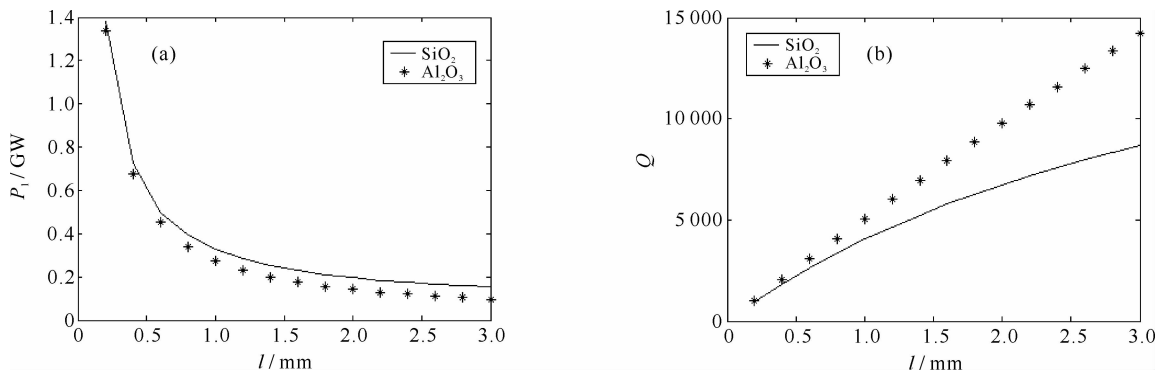


Fig. 5 Curves of power loss and quality factor vs longitudinal length of microcavity

图 5 功率损耗和品质因数随纵向长度变化曲线

3 色散特性

截取纵向长度为 l 的共轴环光子晶体缺陷微腔，在其一端加上厚度为 h 、电子注开孔半径为 r 的理想导体板，以此为周期单元可以构建具有光子带隙结构的慢波系统。慢波系统是行波管、返波管、正交放大管等行波型 μ VED 的主要组成部分，其主要作用是降低高频电磁波的相速，使之与电子注同步，以便与电子注进行有效的相互作用，从而放大电磁能量。慢波系统的主要特性是色散特性，它描述沿系统纵向传播的电磁波的相速 v_p 和频率 f 之间的关系，也可表示为频率 f 与相移常数 β 的关系。本文利用软件 MWS，采用数值计算方法，讨论此类具有共轴环光子晶体缺陷微腔结构的慢波系统的色散特性。

在 MWS 中，以一个周期单元为对象建立模型，设定周期性边界条件，利用本征模求解器计算类 TM_{01} 模式在给定周期相移 ϕ 下的频率 f ，则求相速 v_p 的公式为

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{2\pi fL}{\phi} \quad (3)$$

式中： ω 为角频率；相移 $\phi = \beta L$ ， $L = l + h$ 为周期长度。

以上述具有缺陷微腔的 SiO_2 共轴环光子晶体构成的慢波系统为例，在 $l = h$ 取定值 0.12 mm 的情形下，计算了 r 分别取 $r_1/2, 2r_1/3, 3r_1/4$ 时的色散关系以及慢波比 (v_p/c) 曲线，结果如图 6 所示。

由图 6 可见，该系统的工作带宽在 2% 左右，相移在 $30^\circ \sim 180^\circ$ 之间对应的慢波比均小于 1，且慢波比曲线平坦。因此，该慢波系统适合工作在前向波状态，可应用于行波管等真空器件中。电子注开孔半径越大工作频率越高，带宽也越大，但对慢波相速基本上没有影响。对于实际器件，较小的电子注开孔将提高对电子枪和聚焦磁场的要求，尤其是高频情况下；而电子注开孔半径过大，又会影响系统中场分布的均匀性。以下讨论周期长度对色散特性的影响时，取电子注开孔半径 $r = 2a/3$ 。

图 7 给出了周期长度 $L = l + h = 2h$ 分别为 0.24, 0.30, 0.40 mm 时的色散关系和慢波比曲线。结果表明，周期长度越短，工作频段越宽，慢波相速降低越明显，这样对于降低阴极电压非常有利，从而也减小了电子枪的

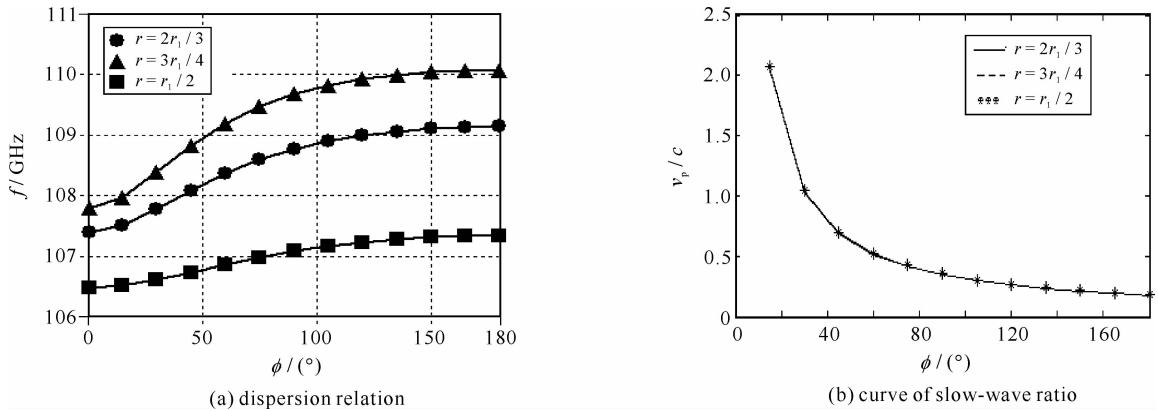


Fig. 6 Dispersion relation and curve of slow-wave ratio for different electron beam hole size

图6 电子注开孔半径不同时的色散关系及慢波比曲线

设计难度。但是,较短的周期长度往往造成耦合阻抗很小,致使电子注和电磁波互作用的效率降低。因此,在实际应用时,应该综合考虑上述因素的影响,以达到最佳优化设计。

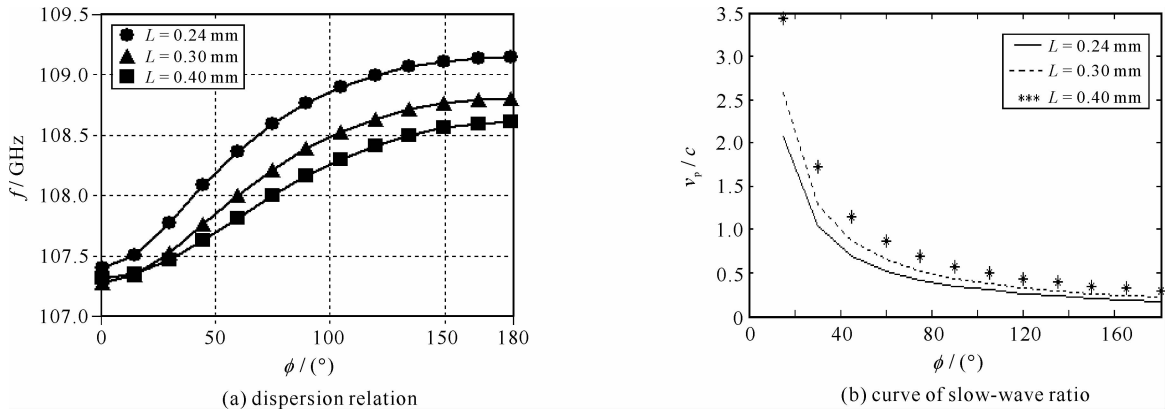


Fig. 7 Dispersion relation and curve of slow-wave ratio for different period length

图7 周期长度不同时的色散关系及慢波比曲线

4 结论

本文采用数值计算方法,讨论了两种共轴环光子晶体缺陷微腔的谐振特性,并以此缺陷微腔为基础构建慢波系统,分析了该系统的色散特性。结果表明:微腔内存在沿径向限制较好的单一的类 TM_{010} 谐振模式;随着微腔纵向长度的增加,功率损耗减小,品质因数迅速增加,且介质层的介电常数越高,对于提高品质因数越有利。具有此缺陷微腔的慢波系统可以工作在前向波状态,慢波比曲线平坦,且电子注开孔半径越大、周期长度越小,则系统的工作频率越高、带宽也越大。

参考文献:

- [1] Han S T, Jeon S G, Shin Y M, et al. Experimental investigations on miniaturized high-frequency vacuum electron devices[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2005, **33**(2):679-684.
- [2] Joan G G, Ferran M, Robert E M. Optimization of micromachined reflex klystrons for operation at terahertz frequencies[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2004, **52**(10):2366-2370.
- [3] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, **58**(20):2059-2061.
- [4] 冯尚申,沈林放,何赛灵.一种具有大带隙的各向异性二维光子晶体结构[J].光子学报,2003,**32**(2):13-16.(Feng Shangshen, Shen Linfang, He Sailing. A two-dimensional anisotropic photonic crystal with a large absolute band gap. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(2):13-16)
- [5] 陈波,钟宝良,钟辉煌.具有光子晶体带隙结构的返波振荡器的初步研究[J].强激光与粒子束,2006,**18**(5):862-866.(Chen Bo, Zhong Baoliang, Zhong Huihuang. A novel BWO with photonic band gap structure. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(5):862-866)
- [6] Jang K H, Jeon S, So J K, et al. Experimental investigation on high order mode reflex klystron using cold cathode[C]//IEEE International Vacuum Electronics Conference. 2006:189-190.
- [7] Ibanescu M, Fink Y, Fan S, et al. An all-dielectric coaxial waveguide[J]. *Science*, 2000, **289**(21):415-419.

- [8] Huang Yongzhen, Chen Qin, Guo Weihua, et al. Application of Padé approximation in simulating photonic crystal[J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, **26**(7):1281-1286.
- [9] Ho K M, Chan C T, Soukoulis C M. Existence of a photonic gap in periodic dielectric structures[J]. *Phys Rev Lett*, 1990, **65**(25):3152-3155.
- [10] 孙志红. 由光子晶体局域模对称关系分析其简并性[J]. 光子学报, 2005, **34**(3):468-472. (Sun Zhihong. Degeneracy analysis based on the symmetry relations of two-dimensional photonic crystal resonant modes. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3):468-472)

Characteristics of coaxial photonic crystal defect microcavity

Liu Xiaojie¹, Lei Hong¹, Yu Tian¹, Feng Jinjun², Liao Fujiang²

(1. *School of Information Science and Engineering, Shandong University, Ji'nan 250100, China;*

2. *Vacuum Electronics National Laboratory, Beijing Vacuum Electronics Research Institute, Beijing 100016, China*)

Abstract: The field-pattern of various defect modes in the coaxial photonic crystal microcavity has been simulated using the numerical calculation method. The quality factor (Q-factor) and power loss of the microcavity have been calculated and the effect of geometrical parameters on the resonance characters was analyzed. Based on the defect microcavity, a periodic slow-wave system was constructed and the dispersion relation of this system has been discussed. The results indicate that a single defect mode can be gained in the microcavity and the resonance characters are sensitively affected by the longitudinal length of the cavity and the dielectric constant of medium rings. The slow-wave system has presented a good dispersion property and a relatively smooth slow-wave ratio curve with a wide range of the ratio below 1. Increasing the electron beam hole radius and decreasing the periodic length would result in higher operating frequency and wider bandwidth.

Key words: photonic crystal; defect microcavity; power loss; quality factor; periodic slow-wave system; dispersion