

基于磁性光子晶体的高性能微波带通滤波器

顾艳,伍瑞新

(南京大学 电子科学与工程学院,江苏 南京 210093)

摘要:提出了一种基于磁性光子晶体的高性能微波带通滤波器。仿真计算和实验测量结果表明,该滤波器矩形系数好,插入损耗小,带外抑制高且带内平坦。研制的中心频率为 10.75 GHz 的通带滤波器,带宽达 1.3 GHz,通带内插入损耗小于 5 dB,带外抑制 50 dB 以上。改变磁性圆柱的半径或磁性光子晶体的晶格常数可设计出工作在不同频段,具有不同带宽的微波滤波器。

关键词:磁性光子晶体;带通滤波器;矩形系数;带外抑制;插入损耗

中图分类号:TN713 **文献标识码:**A

High Performance Microwave Band-pass Filter Based on Magnetic Photonic Crystals

GU Yan, WU Ruixin

(School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: A new band-pass filter based on magnetic photonic crystals is proposed to meet the high performance filter requirements in microwave communication system. Simulations and experiments show the new filter has good shape factor, low insertion loss, high band rejection and flat pass-band. A band-pass filter working at 10.75 GHz was fabricated. Bandwidth of the filter is up to 1.3 GHz, insertion loss is less than 5 dB and band rejection is larger than 50 dB. The filter working at different frequencies and with different bandwidth could be realized by changing the radius and lattice constant of magnetic photonic crystals.

Key words: magnetic photonic crystals; bandpass filter; shape factor; band rejection; insertion loss

0 引言

在高性能通信系统中,低损耗和高功率容量的滤波器有着重要的作用。为了保证信号波形无畸变的传输,小矩形系数和带内平坦的高性能滤波器是必不可少的器件之一。近年来,随着宽带通信技术受到了越来越多的重视,宽带滤波器的应用变得越来越重要。微波段的宽带滤波器可由多种结构来实现,如集总参数 LC、微带线、波导等^[1-3],但这些结构的滤波器结构复杂、造价高且性能不优。为了实现高性能的宽带滤波器,人们研究了利用光子晶体的能带特性来实现宽带滤波器^[4-6]。光子晶体独特的能带结构及由此导致的奇特电磁特性使其成为近几

十年来一直备受关注的热点研究课题^[7-8]。近年来的一个研究热点是由铁氧体材料构成的磁性光子晶体。在微波频段磁性材料的性质将会使磁性光子晶体具有可观的各向异性、特殊的能带结构等一系列新的电磁特性。低损耗、磁共振导致的负磁导率,较高的响应速度和高电阻率等特性,使磁性光子晶体在电磁通信、电子工程及医疗等多个领域表现出了巨大的应用潜力。

本文提出了一种基于磁性光子晶体的高性能带通滤波器,其结构是由铽-永磁铁氧体构成的磁性光子晶体。这种带通滤波器不仅具有矩形系数小,频带宽,带内平坦且带内插入损耗低,带外抑制高等优点,且有体积小,结构简单,易加工,成本低,易实现

收稿日期:2013-04-03

基金项目:教育部博士点基金资助项目(20110091110030, 20100091120045);江苏省自然科学基金资助项目(BK2012722)

作者简介:顾艳(1988-),女,江苏启东人,硕士生,主要从事光子晶体在定向传输及吸收中的应用。E-mail:yygg1177@163.com。伍瑞新(1962-),男,博士生导师,教授,主要从事材料高频物性,人工电磁材料设计与应用,微波器件和技术等方面的研究。主持承担了国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)、国家自然科学基金项目、教育部博士点基金等 10 多项研究课题。已发表学术论文 70 多篇,其中被 SCI、EI 收录论文 40 多篇。E-mail:rxwu@nju.edu.cn。

等优点。通过改变磁性圆柱的半径或磁性光子晶体的晶格常数可设计出不同频段、不同带宽的滤波器。由于采用了永磁铁氧体材料,滤波器不需外加偏置磁场,这为基于磁性光子晶体的微波器件的实际应用提供了极为便利的应用条件。

1 理论模型

图 1 为滤波器的二维示意图。磁性光子晶体为四方点阵,晶格常数 $a=8\text{ mm}$ 。光子晶体滤波器由铽-永磁铁氧体圆柱构成,铁氧体圆柱半径 $r=2\text{ mm}$ 。材料的介电常数为 $21.5-0.2i$,它在微波段基本上为一个常数。永磁铁氧体圆柱内禀场沿着圆柱轴向,它在本文中定为 z 轴。振动样品磁强计(VSM)测量显示铽-永磁铁氧体有个很好的方形磁滞回线,其饱和磁化强度 $4\pi M_s$ (其中 M_s 为饱和磁化强度和剩磁 $4\pi M_r$ (其中 M_r 为铁磁材料内部剩磁)分别为 $4\ 300\times 10^{-4}\text{ T}$ 和 $3\ 600\times 10^{-4}\text{ T}$ 。

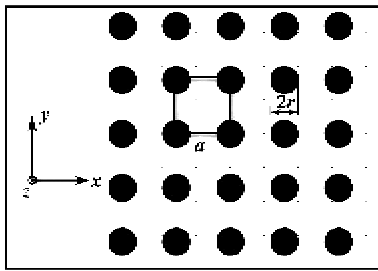


图 1 滤波器的二维示意图

为了设计带通滤波器,我们先计算了光子晶体滤波器的传输特性,研究了光子晶体的结构参数等对滤波器性能的影响。采用商用软件 COMSOL 来仿真模拟滤波器的各项性能。在计算中铽-永磁铁氧体的磁导率是一个张量。这是因为材料中磁矩将沿着内禀磁场方向的进动,进动满足 Landau-Lifshitz-Gilbert 方程,在有射频频场时磁性材料的磁导率呈张量形式。在完全磁化条件下,磁导率的张量^[9]为

$$\bar{\mu}_r = \begin{pmatrix} \mu & i\kappa & 0 \\ -i\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\mu = 1 + \frac{\omega_m(\omega_0 + i\alpha\omega)}{(\omega_0 + i\alpha\omega)^2 - \omega^2} \quad (2)$$

$$\kappa = \frac{\omega_m\omega}{(\omega_0 + i\alpha\omega)^2 - \omega^2} \quad (3)$$

$$\omega_m = 4\pi\gamma M_s \quad (4)$$

$$\omega_0 = \gamma(H_A - N_z \times 4\pi M_r) \quad (5)$$

式中: ω_0 为谐振频率; γ 为旋磁比; H_A 为各向异性场; N_z 为退磁因子; ω_r 为铁磁材料的特征频率; α 为铁氧体的损耗系数。

对于永磁材料,要达到完全磁化很难,绝大多数永磁材料都工作在部分磁化状态。但本文中采用的铽-永磁铁氧体的剩磁接近饱和和磁化强度,所以可近似地使用完全磁化条件下的张量磁导率来表示。通常铽-永磁铁氧体的 H_A 为 238 A/m ^[9]。

2 磁性光子晶体带通滤波器的设计

2.1 带通滤波器的滤波特性

图 2 为 8×8 阵列滤波器的传输特性的计算结果。由图可知,滤波器 -3 dB 的带宽范围为 $10.1\sim 11.8\text{ GHz}$,有近 1.7 GHz 的带宽,插入损耗小于 4 dB ,带外抑制大于 60 dB ,矩形系数(-40 dB 带宽和 -3 dB 带宽之比)为 1.68 ,且整个通带具有很好的平坦度。由图 2 可看到,本文提出的滤波器结构简单,带外抑制大,矩形系数好,带宽较宽,这是其他类型相近尺寸的滤波器很难达到^[3,10]。

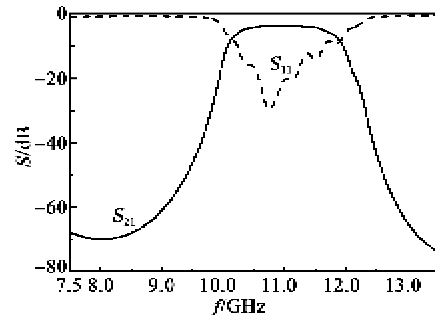


图 2 铁氧体 $r=2\text{ mm}$ 、 $a=8\text{ mm}$ 在 $7.5\sim 13.5\text{ GHz}$ 时滤波器 S 参数仿真结果

2.2 光子晶体结构参数对滤波器性能的影响

在永磁铁氧体 r 确定时,改变 a ,将会改变滤波器的滤波带宽。图 3 为当 a 取不同数值时滤波器传输特性的计算结果。从图可看出, $a=6\text{ mm}$ 、 8 mm 、 10 mm 时,通带的中心频率分别为 11.2 GHz 、 10.95 GHz 、 10.8 GHz ,带宽分别为 3 GHz 、 1.7 GHz 、 1.4 GHz ,相对带宽分别为 26.7% 、 15.5% 、 13.0% ,矩形系数分别为 1.49 、 1.68 、 1.78 。增大 a ,滤波器的中心频率及带宽将会降低,矩形系数将增大,但中心频率与矩形系数的变化幅度较小。改变 a ,对滤波器的带外抑制也有一定的影响,但滤波器仍具有较大的带外抑制及较好的带内平坦度。因此,我们可灵活地改变磁性光子晶体的 a ,以满足不同带宽的带通滤波器的设计需求。

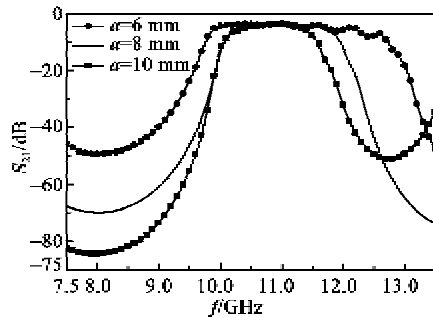


图3 $r=2$ mm, a 不同时滤波器的 S_{21} 参数仿真结果

在保持 r/a 不变的情况下, 改变 r , 将会得到工作在不同频段的带通滤波器。图4为 $r/a=0.25$, 改变 r 时得到的滤波器传输特性。由图可知, 随着 r 的减小, 带通滤波器滤波频段将会向高频移动。 $r=4$ mm, 2 mm, 1 mm 时, 通带的中心频率分别为 5.5 GHz, 10.95 GHz, 21.85 GHz, 带宽分别为 1 GHz, 1.7 GHz, 3 GHz, 相对带宽分别为 18.2%, 15.5%, 13.7%, 矩形系数分别为 1.5, 1.68, 1.9。随着 r 等比地减小, 滤波器的中心频率等比地增加, 带宽也在增加, 但相对带宽却减小, 同时矩形系数略微增大, 而滤波器的带外抑制、带内平坦度基本不受圆柱半径 r 的影响。

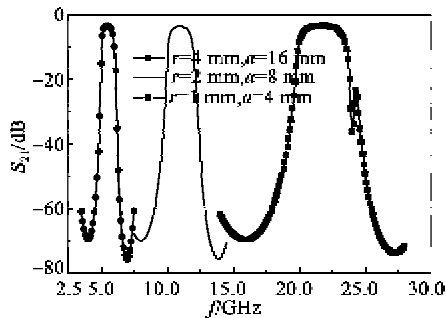


图4 保持 r/a 不变, r 取不同值时滤波器的 S_{21} 参数仿真结果

由图3、4的计算结果可知, 在设计磁性光子晶体带通滤波器时, 可先根据滤波器频段的需求确定铁氧体 r 的大小, 然后再根据滤波带宽的要求, 确定 a 的大小, 从而就可设计出任意频段的带通滤波器。

2.3 光子晶体大小对带通滤波器性能的影响

除了前面所述的光子晶体结构参数会影响滤波器的特性外, 光子晶体的尺寸也会影响到滤波器的滤波特性。在前面的滤波器设计中, 磁性光子晶体阵列大小为 8×8 , 当铁氧体 $r=2$ mm, $a=8$ mm 时, 在图1所示的 xy 平面上, 滤波器是一个边长为 64 mm 的正方形。在保持铁氧体 r 和 a 不变的情况

下, 我们通过改变滤波器的阵列大小, 研究了光子晶体的尺寸的影响。如图5所示, 随着阵列的减小, 滤波器的中心频率及带宽保持不变, 带外抑制在减小, 矩形系数在增大, 同时通带内的平坦度也有所降低。当阵列大小减小为 4×4 时, 滤波器带外抑制仍大于 30 dB, 带内平坦度也很好, 而此时在 xy 平面上滤波器是一个边长仅为 32 mm 的正方形, 相当于一个 1 元硬币的大小。因此, 采用光子晶体滤波器可在保证滤波器性能的同时通过减小滤波器的大小来构建小尺寸的滤波器, 即是磁性光子晶体带通滤波器可在保持较好性能的同时还能拥有较小的尺寸。

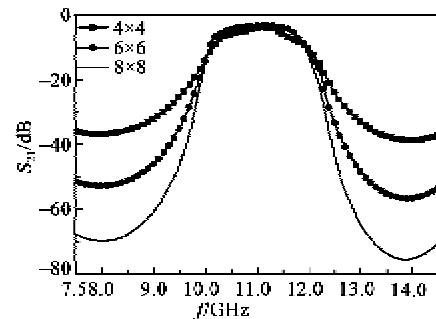


图5 铁氧体 $r=2$ mm, $a=8$ mm 时, 减小滤波器的阵列大小 S_{21} 参数仿真结果

3 带通滤波器的制备、测试及结果分析

根据以上的研究结果, 我们用铈-永磁铁氧体圆柱实际制备了滤波器。永磁铁氧体圆柱的直径为 $\varnothing 4$ mm, 高度为 10 mm, 将铁氧体镶嵌在介电常数近似为 1 的泡沫材料中, 上、下端面覆盖金属片构成滤波器。实际样品如图6中的插图所示(其中覆盖的金属片已除去), 滤波器阵列大小为 8×8 , 边长 64 mm \times 64 mm。利用矢量网络分析仪及平行板波导对滤波器进行测量, 测试结果如图6所示。实验结果显示, 在 10.1~11.4 GHz 间, 滤波器有一个插入损耗小于 5 dB 的通带, 带外抑制大于 50 dB, 矩形系数为 1.34, 同时滤波器的通带具有很好的带内平

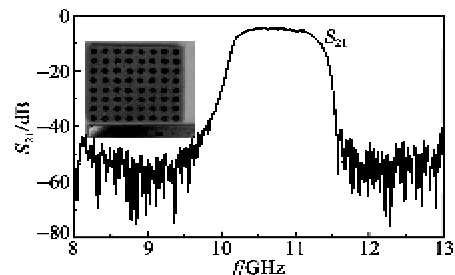


图6 铁氧体 $r=2$ mm, $a=8$ mm 时滤波器 S_{21} 参数的实验结果

坦度,符合高性能的滤波要求。实验与仿真相比,除在带宽、中心频率上略有差别外,整个曲线和理论计算结果相吻合。

4 结束语

本文提出了一种基于磁性光子晶体的高性能微波带通滤波器。通过改变铁氧体圆柱的半径或磁性光子晶体的晶格常数,可设计出不同频段、不同带宽的高性能宽带微波滤波器,并且可实现小尺寸的滤波器。对实际制作的滤波器的测量证明了滤波器具有低损耗,高带外抑制,小矩形系数,带内平坦等一系列优点,同时还具备体积小,结构简单,易加工、成本低及易实现等特点。实验结果和设计结构很好地相吻合,显现了磁性光子晶体滤波器设计的准确性和有效性。

参考文献:

- [1] 陈世勇,田树林,孟德,等. 新型基片集成波导宽带带通滤波器[J]. 重庆大学学报,2010,33(10):98-101.
CHEN Shiyong, TIAN Shulin, MENG De, et al. A novel substrate integrated waveguide broadband bandpass filter[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(10):98-101.
- [2] 姚兰,洪伟,吴柯. 可调微带矩形环带通滤波器[J]. 微波学报,2011,27(4):57-60.
YAO Lan, HONG Wei, WU Ke. Tunable microstrip rectangular ring bandpass filter[J]. Journal of Microwaves, 2011, 27(4):57-60.
- [3] 陈冰洁,王锡良,胡大成,等. 脊双模波导滤波器的研究[J]. 电子元件与材料,2012,31(10):37-40.
CHEN Bingjie, WANG Xiliang, HU Dacheng, et al. Research on dual-mode rectangular waveguide filters using ridge resonators[J]. Electronic Components and Materials, 2012, 31(10):37-40.
- [4] 陈宪锋,蒋美萍,沈小明,等. 一维多缺陷光子晶体的缺陷模[J]. 物理学报,2008,57(9):5709-5712.
CHEN Xianfeng, JIANG Meiping, SHEN Xiaoming, et al. The defect modes in one-dimensional photonic crystal with multiple defects[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(9):5709-5712.
- [5] 杨海峰,邢孟江. 具有三阶谐振腔的 S 波段 LTCC 带通滤波器设计[J]. 重庆理工大学学报:自然科学版,2012,26(6):98-101.
YANG Haifeng, XING Mengjiang. A design of S-band LTCC passband filter with three resonant cavities[J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2012, 26(6):98-101.
- [6] 徐晓峰,丁佳轶. 基于一维光子晶体异质结构的宽角度入射宽带通滤波器[J]. 东华大学学报:自然科学版,2010,36(5):592-597.
XU Xiaofeng, DING Jiayi. A wide band pass filter of broad angle incidence based on one-dimensional photonic crystal heterostructure[J]. Journal of Donghua University: Natural Science, 2010, 36(5):592-597.
- [7] HE Guanghua, WU Ruixin, POO Yin, et al. Magnetically tunable double-negative material composed of ferrite-dielectric and metallic mesh[J]. J Appl Phys, 2010, 107(9):093522.
- [8] POO Yin, WU Ruixin, HE Guanghua, et al. Experimental verification of a tunable left-handed material by bias magnetic fields[J]. Appl Phys Lett, 2010, 96(16):161902.
- [9] GUENNOU A, QUÉFFÉLEC P, GELIN P, et al. Self-biased Y-junction circulators using polycrystalline hexaferrite: An accurate electromagnetic analysis[J]. J Appl Phys, 2006, 99:08P505.
- [10] 张胜,王子华,肖建康,等. 一种新型基片集成波导双模带通滤波器[J]. 压电与声光,2006,28(6):674-676.
ZHANG Sheng, WANG Zihua, XIAO Jiankang, et al. A novel substrate integrated waveguide(SIW) dual-mode bandpass filter[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2006, 28(6):674-676.