

基于旋磁光子晶体构成的单向波导设计研究

杨 艳, 伍瑞新

(南京大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京 210093)

摘 要:对基于旋磁光子晶体(GMPC)的微波段单向波导,讨论了 GMPC 的晶格常数和 GMPC 与金属限制层距离这两个因素对单向波导工作特性的影响。研究表明,GMPC 的晶格常数将影响单向波导的工作频率,而 GMPC 与金属限制层的距离会影响波导中的传播模式,恰当的距离可使波导表现出良好的单向传输性能和较低的损耗。用钇铁石榴石铁氧体柱制作了微波段单向波导,实验测得该波导的单向传输频段(11.8~13.2 GHz)与仿真结果接近,且单向传输性能不受波导通道缺陷影响。

关键词:波导;光子晶体;微波铁氧体器件;手性边缘态;量子霍尔效应

中图分类号:TN814

文献标识码:A

A Study on Designing Unidirectional Waveguides Composed of GMPC

YANG Yan, WU Ruixin

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

Abstract: For a microwave unidirectional waveguide comprising of gyromagnetic photonic crystals (GMPCs), a discussion was made with emphasizing on the contributions of two factors, the lattice constant and the distance between metal confinement and GMPC, to the one-way waveguide's working characteristics. The study shows that the lattice constant has an evident effect on the unidirectional waveguide's working frequency, while the distance between GMPC and metal confinement influences the waveguide's modes of propagation. Suitable distance between GMPC and metal confinement leads the waveguide to presenting a better one-way transmission property and less loss. A microwave unidirectional waveguide has been fabricated with yttrium iron garnet ferrite rods, and the measured unidirectional-propagating regime (11.8~13.2 GHz) of this waveguide matches well with the simulated results. It is also demonstrated that the one-way propagating characteristic will not be affected by defects along the waveguide passage.

Key words: waveguide; photonic crystals; microwave ferrite devices; chiral edge state; quantum hall effect

0 引言

光子晶体的单向边缘态是近年来备受关注的热点研究课题。鉴于光子和电子的类比性,普林斯顿大学的 Haldane 和 Raghu^[1-2] 首次在理论上预言了电磁的“手性边缘态”。与电子系统中的整数量子霍尔效应相类似,在这种模式下电磁波只能沿着边界向一个方向传播,没有背向散射,不受边界表面障碍物、缺陷的影响。这一发现为光子晶体控制电磁波的传播提供了新的方法,为开发极低损耗光纤及光隔离器等奠定了理论基础。2009年, Wang 工作小组首次在实验上利用磁性光子晶体实现了电磁的手性边缘态^[3]。2011年 Wu 工作小组利用旋磁铁氧体材料构成类石墨烯结构的光子晶体,实验验证了自导的手性边缘态^[4-5]。这些类电子霍尔效应的电

磁手性边缘态具有良好的单向传输性能,对波导的表面构造及其中可能存在的缺陷和障碍不敏感,可进一步用来构成单向波导器件实现更高的传输效率。本文利用物理场耦合软件 COMSOL Multiphysics 和电磁仿真软件 CST Microwave Studio 研究设计了用钇铁石榴石铁氧体构成的光子晶体单向波导,分析了波导的结构参数等对单向波导传输性能的影响,依据仿真结果制造了该单向波导器件,对比发现实验测量的 S 参数结果与仿真符合得很好。该单向光子晶体波导的研制过程对今后分析制造这种光子线路器件具有一定的指导意义。

1 GMPC 单向波导的设计仿真

1.1 构成 GMPC 的铁氧体材料参数

目前的单向手性边缘态实验大多以磁性材料为

收稿日期:2013-04-17

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:杨艳(1988-),女,江苏丹阳县人,硕士生,主要从事光子晶体设计研究。E-mail: yangytp@gmail.com。伍瑞新(1962-),男,教授,主要从事磁性光子晶体、微波器件和电路设计等方面的研究。

载体。本设计使用了磁性铁氧体圆柱构成旋磁光子晶体(GMPC)。该圆柱半径为 2 mm,柱子高度为 10 mm。圆柱由钇铁石榴石铁氧体制成,它在微波段损耗较小,相对介电常数为 $15.26 - j0.006$;磁柱在外场偏置下,磁导率为张量^[5-6],饱和磁化强度为 1.884×10^{-4} T,共振线宽为 3 978.9 A/m。为了使设计简单,本文采用空气背景与铁氧体柱共同构成 GMPC。

1.2 GMPC 的晶格类型

目前,实现手性边缘态的非复合结构 GMPC 多采用四方或蜂窝晶格。具有蜂窝结构的光子晶体在边界上不需额外的限制层就可实现电磁单向传输,在边界上传输的单向电磁波为表面波模式;四方晶格的 GMPC 边界上要实现手性边缘态,因边缘态出现在投影能带的光锥内部,通常,在边界上需限制层(金属或光子晶体)与其共同构成波导通道,在其中传输的电磁波为波导模式,易与传统的波导比拟和用波导理论分析,且铁氧体柱排布过程比蜂窝结构简易,所以本文制作 GMPC 时采用了四方晶格。本文的限制层采用金属挡板。

1.3 GMPC 的晶格常数的影响

考虑由铁氧体圆柱呈四方晶格排布在空气背景中组成完整的 GMPC。当未施加外部偏置磁场时,该大块 GMPC 的能带中将会存在简并点,施加一个外部磁场后,时间反演对称性被破坏,两条能带的简并点处会发生破缺形成一个带隙。该带隙的宽度大小与时间反演对称性的破坏程度有关,一定程度上与外加偏置磁场强度有关。完整的 GMPC 被截断后,在该带隙内就会出现电磁的手性边缘态。因而确定了简并点出现的频率,就可预估该 GMPC 中单向传输的手性边缘态的工作频率。

使用 COMSOL 仿真的晶格常数分别为 10 mm、20 mm 和 15 mm,未加偏置场时完整 GMPC 的能带如图 1 所示,其中最低频率的简并点已用椭圆表示。因铁氧体柱高已确定,将 GMPC 置于平行板波导中进行测量时,平行板波导可支持的横电磁波(TEM)模式的最高频率为 15 GHz。当 GMPC 晶格常数为 10 mm(见图 1(a)),简并点出现的频率较接近 15 GHz,可能实际测量时会受到高次模的干扰;当晶格常数为 20 mm 时(见图 1(b)),简并点与上一级能带较接近,且晶格常数较大,制作的 GMPC 尺寸也较大;当晶格常数为 15 mm 时,简并

点位于 12 GHz(见图 1(c)),较合适,故确定 GMPC 四方晶格的晶格常数为 15 mm。

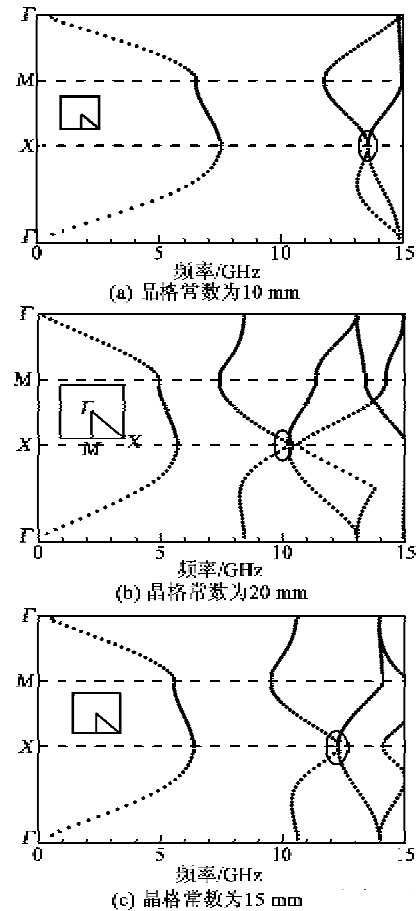


图 1 晶格常数不同时 GMPC 的能带

1.4 单向波导宽度的影响

金属限制层与 GMPC 边界间的距离,即单向波导的宽度,会影响到 GMPC 边缘态能带的形态从而影响到单向波导的传输特性。图 2 为施加外部偏置磁场后,单向波导的宽度分别为 8 mm、12 mm、10 mm 时,波导的投影能带图和传输谱仿真。图中, k 为布里渊区中的布洛赫波矢, a 为晶格常数, ka/π 为归一化的布洛赫波矢。在计算投影能带时,张量磁导率模型中的内秉场设置为 39 789 A/m。图中大片的阴影区域为施加外部偏置磁场后完整 GMPC 的投影能带。由图 2 可看到,完整 GMPC 的投影能带中有 2 个完全带隙。当完整 GMPC 被截断并附上限制层后,在截断的边界上会出现边缘态,在投影能带图的第 2 个带隙中出现了 2 条边缘态能带,分别用实线和虚线表示。边缘态能带的出现,是由于外加磁场的存在导致了麦克斯韦方程的时间反演对称性被破坏。这两条边缘态能带分别对应 GMPC 被

截断的相对的两个边界上出现的电磁手性边缘态。边缘态能带的斜率正、负反应了电磁波的传播方向。在 12~13 GHz, 各个投影能带图中的边缘态斜率符号相同, 该频率范围内电磁波是单向传输的。用 CST MWS 计算了波导的传输特性, 计算模型如图 3 所示。在 12~13 GHz, 离散端口 1 和 A 的传输系数 $S_{A1} \gg S_{1A}$, 表明在该频段电磁波能量沿着通道向左传输。图 4 为在 12.1 GHz 时的场分布图, 显示出了典型的单向传输特性。能带计算结果和传输谱仿真结果完全相符。

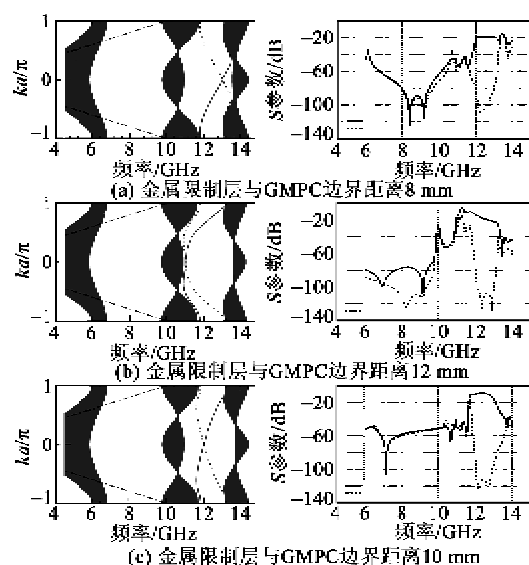
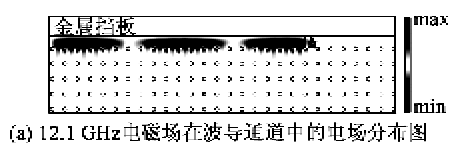
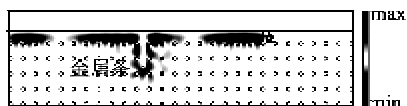


图2 不同金属限制层与 GMPC 边界距离下的能带和传输谱



(a) 12.1 GHz 电磁场在波导通道中的电场分布图



(b) 12.1 GHz 电磁场在有金属障碍的波导通道中的电场分布

图3 实际制作的 GMPC 单向波导结构示意图



图4 12.1 GHz 时单向波导通道中的电场场强分布图

当单向波导宽为 8 mm (见图 2(a)), 边缘态能带在带隙频率的高端与阴影区域所示的 GMPC 体

模有耦合, 部分电磁波能量耦合到 GMPC 中, 传输谱中单向传输频段波导的损耗较大; 当单向波导宽为 12 mm 时 (见图 2(b)), 边缘态在带隙频率的低端与 GMPC 体模有耦合, 传输谱中 12 GHz 前, S_{A1} 与 S_{1A} 的差值较小, 单向传输性能不佳, 且单向传输损耗相对图 2(c) 中略大。当单向波导宽为 10 mm 时 (见图 2(c)), 边缘态和 GMPC 的体模间没有重叠, 在整个禁带中只有单一的边缘态模式出现, 在 11.8~13.2 GHz 该手性边缘态能带的斜率具有相同符号, 传输谱中的 S_{A1} 与 S_{1A} 差值较大, 损耗相对较小, 单向传输性能较好。

1.5 COMSOL 仿真单向波导中场分布图

图 4 中, 标五角星处为一一线源, 由此可看出绝大部分的电磁波能量向左传输, 在线源右侧几乎没有场分布, 直观地验证了该波导良好的单向传输性能。当在波导通道中放入一个金属细条后, 电磁场会自动寻找路径绕过该金属障碍, 继续向通道左侧传播, 说明该波导的单向传输性质对通道缺陷不敏感^[3-10]。

2 实验结果与讨论

2.1 基于 GMPC 的单向波导的制作

图 3 为根据仿真结果实际制造的基于 GMPC 单向波导的示意图。GMPC 和金属挡板构成的通道夹在上、下两块金属平板中。单向波导四周排布了吸波材料以模拟无限空间。在波导通道的左、右两侧分别是 2 个探针, 一个位于位置“1”处用作源探针馈入电磁波能量, 另一个位于位置“A”处用作检测探针。GMPC 的晶格常数为 15 mm, 金属限制层与 GMPC 边界距离为 10 mm, 金属平板构成的平行板波导和金属挡板的高为 10 mm。

2.2 单向波导的传输谱测量结果

使用矢量网络分析仪 E8363A 进行了源探针 (“1”) 和检测探针 (“A”) 间的传输谱测量。测量结果如图 5(a) 所示。在 11.8~13.2 GHz 时, $S_{A1} \gg S_{1A}$ 。在 12.25 GHz 处两者差值达到最大 (为 51.1 dB)。几乎所有的电磁波能量都沿着通道左侧方向传播, 该波导具有良好的单向传输性能。与图 2(c) 相比, 实验测量的传输谱单向频段 (11.8~13.2 GHz) 以及第 1 个带隙的频段 (7.6~10 GHz) 与计算的投影能带结构和 CST 的仿真结果都相吻合。

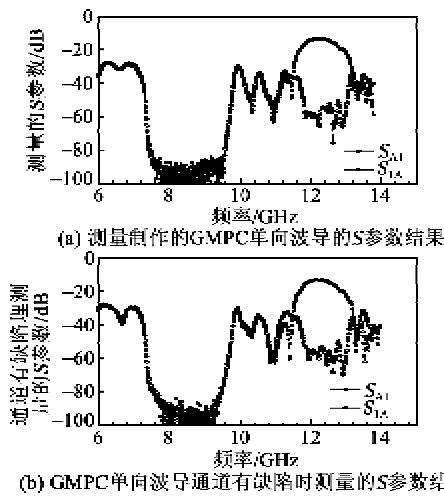


图5 测量实际制作的GMPC单向波导的S参数结果

为了验证该波导的单向传输性质不受波导通道中障碍和缺陷的影响,将图3中波导通道一侧的1根铁氧体柱子(标十字处)换成金属柱以模拟存在缺陷的情况,再次进行传输谱测量,结果如图5(b)所示。对比图5(a)、(b)可看出,在单向传输频段,其形态基本没有发生变化,前向和后向传输系数间仍存在较大的差异,进一步说明单向传输性能对通道缺陷和障碍不敏感。这也正是这类GMPC单向波导优于传统定向波导的重要特点。

3 结束语

本文研究了基于旋磁光子晶体构成的单向波导器件的传输特性。采用钇铁石榴石材料的铁氧体圆柱构造了旋磁光子晶体,外加金属挡限制层共同组成了单向波导。研究了单向波导的宽度和磁性光子晶体的晶格常数对单向波导特性的影响,结果显示,GMPC的晶格常数会明显影响单向波导的工作频率,而GMPC与金属限制层的距离则会影响波导中的传播模式,恰当的距离可使波导单向传输性能较好,且损耗较低。多物理耦合场软件COMSOL计算的场分布图直观显示该波导的单向传输性能。根据仿真模拟的结果实际制造了该单向波导,并对其进行了传输谱测量,实验与仿真的S参数结果在单向微波频段符合很好,且实验与仿真都证明该旋

磁光子晶体波导的单向传输性能对通道内部的缺陷和障碍不敏感,具有良好抗干扰性。

参考文献:

- [1] HALDANE F D M, RAGHU S. Possible realization of directional optical waveguides in photonic crystals with broken time-reversal symmetry[J]. Phys Rev Lett, 2008, 100(1): 013904.
- [2] RAGHU S, HALDANE F D M. Analogs of quantum-Hall-effect edge states in photonic crystals[J]. Physical Review A, 2008, 78(3): 033834.
- [3] WANG Z, CHONG Y D, JOANNOPOULOS J D, et al. Observation of unidirectional backscattering-immune topological electromagnetic states[J]. Nature, 2009, 461(7265): 772-775.
- [4] AO Xianyu, LIN Zhifang, CHAN C T. One-way edge mode in a magneto-optical honeycomb photonic crystal[J]. Physical Review B, 2009, 80(3): 033105.
- [5] POO Y, WU Ruixin, LIN Zhifang, et al. Experimental realization of self-guiding unidirectional electromagnetic edge states[J]. Phys Rev Lett, 2011, 106(9): 093903.
- [6] 蒲殷. 应用磁性光子晶体调控电磁波传播的理论与实验研究[D]. 南京: 南京大学, 2012.
- [7] 何程. 光子晶体中非互易性质研究[D]. 南京: 南京大学, 2011.
- [8] YU Zongfu, VERONIS Georgios, WANG Zheng, et al. One-way electromagnetic waveguide formed at the interface between a plasmonic metal under a static magnetic field and a photonic crystal[J]. Phys Rev Lett, 2008, 100(2): 023902.
- [9] WANG Zheng, FAN Shanhui. Suppressing the effect of disorders using time-reversal symmetry breaking in magneto-optical photonic crystals: An illustration with a four-port circulator[J]. Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, 2006, 4(3): 132-140.
- [10] HE Cheng, CHEN Xiaolin, LU Minghui, et al. Tunable one-way cross-waveguide splitter based on gyromagnetic photonic crystal[J]. Appl Phys Lett, 2010, 96(11): 111111.