

## 基于磁畴壁的超宽带单向波导

沈 谦<sup>1,2</sup> 沈林放<sup>2,3</sup> 沈 云<sup>2</sup> 尤 运<sup>2</sup> 邓晓华<sup>2</sup>

(1. 南昌大学信息工程学院, 南昌, 330031; 2. 南昌大学空间科学与技术研究院, 南昌, 330031; 3. 浙江工业大学应用物理系, 杭州, 310023)

**摘 要:** 基于磁光材料的磁畴壁, 提出了一种新型超宽带单向波导。该波导的基本模型是一个金属-铁氧体-铁氧体-金属构成的多层波导系统, 中间两层铁氧体为钇铁石榴石 (Yttrium iron garnet, YIG), 它们分别处于两个大小相等方向相反的外部静态磁场中。理论分析和仿真结果表明, 该波导中除了 YIG 材料固有的光子带隙之外, 还存在一个由有限铁氧体厚度导致的新的光子带隙。两个光子带隙均支持能够免疫散射和背向反射的完全单向电磁模式。该波导系统具有结构简单, 免疫散射以及超宽带工作频带等优点, 是实现全光子集成电路的有效途径。

**关键词:** 磁畴壁; 单向波导; 磁光材料

**中图分类号:** TN491      **文献标志码:** A

## Ultra-broadband Unidirectional Waveguide Based on Magnetic Domain Wall

Shen Qian<sup>1,2</sup>, Shen Linfang<sup>2,3</sup>, Shen Yun<sup>2</sup>, You Yun<sup>2</sup>, Deng Xiaohua<sup>2</sup>

(1. School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang, 330031, China; 2. Institute of Space Science and Technology, Nanchang University, Nanchang, 330031, China; 3. Department of Applied Physics, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, 310023, China)

**Abstract:** A new ultra-broadband unidirectional waveguide is proposed based on magnetic domain wall of magnetic-optical (MO) materials. The basic model of the proposed waveguide is a layered structure consisting of metal-YIG-YIG-metal, where the YIG is yttrium iron garnet under anti-parallel static external magnetic fields. Theoretical analysis and simulation results show that our system supports one-way electromagnetic (EM) modes within not only the inherent photonic bandgap of YIG, but also the new photonic bandgap arising from the finite thickness of YIG. Both of the two photonic bandgaps support complete one-way EM modes, which can be immune to scattering and back-reflection. Because of simple structure, robust immunity as well as ultra-broadband one-way operating frequency band, the proposed waveguide is an effective way to realize all photonic integrated circuit.

**Key words:** magnetic domain wall; unidirectional waveguide; magnetic-optical material

## 引 言

近年来, 单向波导因其在全光子集成电路的潜在应用而备受关注<sup>[1-8]</sup>。基于非互易手性边缘态的旋

磁光子晶体通常被认为是实现单向波导的常见方式。由于手性边缘态的非互易性特性,通常可以用对表面态的约束来实现单向波导<sup>[9-10]</sup>。这种单向手性边缘态存在于二维旋磁光子晶体的边缘,其优点是对粗糙材料表面具有很强的鲁棒性<sup>[11]</sup>,缺点是结构过于复杂,不利于光学集成。此外,现有的单向光子晶体波导对频率非常敏感,这使得它们的工作频段极窄。为了避免这些问题,有研究者提出了一种反平行磁化介质界面的单向边缘模式,它沿着垂直于磁化方向且与界面平行的方向传播<sup>[12]</sup>。然而,这种单向边缘模式极易与磁光材料中的体模式耦合并且不免粗糙表面散射,而完全光滑的表面工艺很难实现,不利于该模式的应用推广。最近,有研究者提出一个铁氧体-铁氧体(YIG-YIG, YY)结构的单向波导,该波导结构简单且免疫散射<sup>[13]</sup>。这种单向波导的工作频段仅位于旋磁材料的固有光子带隙,其固有光子带隙之外的模式却极易与体模式耦合,限制了其单向工作频带。有研究表明,通过在介质中引入光子晶体结构可以压缩乃至移除体模式<sup>[14]</sup>。同时,在太赫兹和微波段,金属可近似为完美电导体,体模式可以通过用金属截断介质这种简单的方法抑制<sup>[15-16]</sup>。

本文利用金属截断介质的方法,提出一种基于磁畴壁的新型超宽带单向波导,其基本模型是一个金属-铁氧体-铁氧体-金属构成的多层波导系统,中间两层铁氧体分别处于两个大小相等方向相反的外部静态磁场中。与YY结构相比,由于引入的金属层压缩了磁光材料的体模式,该结构中除了旋磁材料固有的光子带隙之外,还出现了一个新的支持单向电磁模式的光子带隙,明显扩大了单向波导的工作频带。与旋磁材料固有的光子带隙内支持的单向模式一样,新出现的单向模式也能免疫散射和背向反射。此外,与YY结构半无限大介质层不同,这种新型波导的介质层厚度有限,更利于实际应用。这种结构简单,能够免疫散射以及具有超宽单向工作频带的单向波导,在实现全光子电路微型化和集成化方面具有广阔的应用前景。

## 1 物理模型

基于磁畴壁(Magnetic domain wall)的超宽带单向波导的物理模型如图1(a)所示,中间的黑色虚线框表示磁畴壁。该模型是一个由金属-铁氧体-铁氧体-金属(Metal-YIG-YIG-metal, MYYM)构成的多层波导系统,两层旋磁材料厚度为 $d$ ,它们分别处于两个大小相等方向相反的外部静态磁场 $H_0$ 中,金属层在微波段相当于完美电导体。下文将讨论旋磁材料的厚度为7.8 mm和3 mm两种情况。本文中的铁氧体为钇铁石榴石(YIG),其相对介电常数 $\epsilon$ 为15,相对磁导率 $\vec{\mu}$ 具有以下形式<sup>[17]</sup>

$$\vec{\mu} = \begin{bmatrix} \mu_1 & \pm i\mu_2 & 0 \\ \mp i\mu_2 & \mu_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\mu_1 = 1 + \omega_m(\omega_0 - i\nu\omega)/(\omega_0 - i\nu\omega)^2 - \omega^2$ ,  $\mu_2 = \omega\omega_m/(\omega_0 - i\nu\omega)^2 - \omega^2$ 。 $\omega$ 为角频率, $\omega_0 = 2\pi\gamma H_0$  ( $\gamma$ 为旋磁比)为进动角频率, $\omega_m$ 为YIG的特征角频率, $\nu$ 为YIG的阻尼系数, $\pm$ 和 $\mp$ 分别表示 $H_0$ 的方向。在MYYM模型中只存在横电(Transverse electric, TE)波,通过解麦克斯韦方程,可得到色散方程为

$$\frac{\alpha\mu_1}{\tanh(\alpha d)} + k\mu_2 = 0 \quad (2)$$

式中: $\alpha = \sqrt{k^2 - \epsilon\mu_v k_0^2}$ ,  $\mu_v = \mu_1 - \mu_2^2/\mu_1$ 为Voigt磁导率, $k_0 = \omega/c$ ( $c$ 为光在真空中的速度)。由于YIG的磁介电常数呈各向异性,式(2)中出现传播常数 $k$ 的线性项,破坏了色散方程关于 $k=0$ 的对称性,导致导波在前向和后向传播中出现不同的性质。此外,导波的色散性质还取决于色散方程在 $k \rightarrow \pm\infty$ 时的渐近频率。由于其非互易性,本文分开讨论 $k > 0$ 和 $k < 0$ 的情况。当 $k \rightarrow +\infty$ 时,式(2)的解为

$$\omega_{sp}^+ = \omega_0 + \omega_m \quad (3)$$

当 $k \rightarrow -\infty$ 时,式(2)的解为

$$\omega_{sp}^- = \omega_m - \omega_0 \quad (4)$$

$\omega_{sp}^-$ 与铁氧体-铁氧体(YY)结构中的渐进频率相同<sup>[12]</sup>。令  $d \rightarrow \infty$ , 通过式(2)可推导出YY结构中的色散方程为

$$\alpha\mu_1 + k\mu_2 = 0 \quad (5)$$

与YY结构相比,MYYM结构中的YIG层皆被金属层覆盖,YY结构的基本模型如图1(b)所示。在MYYM结构中,YIG中的体模式转变为必须满足横向共振的束缚模式,其模式特性与YIG的厚度密切相关。这种束缚模式由金属表面和YIG表面的锯齿反射形成,并且通常允许前向和后向传播。

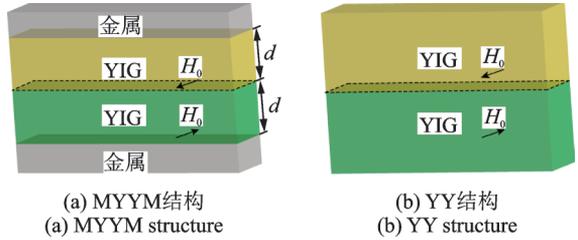


图1 MYYM结构和YY结构的基本模型

Fig. 1 Basic models of MYYM structure and YY structure

为了验证上述理论分析,通过Matlab数值计算了MYYM结构中的色散曲线,如图2(a)所示。该系统的基本物理常数如下: $d = 18 \text{ mm}$ ,  $\nu = 0$  和  $\omega_0 = 0.5\omega_m$ ,  $\omega_m = 10\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$ 。此外,还数值计算了YY结构中的色散曲线作为比较,如图2(b)所示。从图2可以看出,MYYM结构与YY结构中的色散曲线都可分为 $\omega_a$ 、 $\omega_b$ 和 $\omega_c$ 3个区域,分别对应图2中蓝色、红色和绿色曲线。与YY结构相比,MYYM结构在 $1.5\omega_m$ ( $\omega_a$ 区域)处额外存在一个渐进频率,这是由于金属层覆盖导致的铁磁共振频率。此外,由于束缚模式区和体模式区之间的差异,两个结构中 $\omega_b$ 和 $\omega_c$ 区域的色散曲线完全不同。在YY结构中,YIG中的体模式是空间电磁波,其边界由 $\sqrt{k_x^2 + k_y^2} = \sqrt{\epsilon\mu_v} k_0$ 表征。在MYYM结构中,YIG中的束缚模式与体模式类似,其波矢的横向分量 $k_y$ 也是一个实数。因此,通过令 $k = k_x$ 和 $\alpha = ik_y$ (这里 $k_x$ 和 $k_y$ 均为实数),式(2)可重写为

$$\frac{k_y\mu_1}{\tan(k_y d)} + k_x\mu_2 = 0 \quad (6)$$

式中,参数 $k_x$ 和 $k_y$ 除了必须满足式(6),还必须满足 $\sqrt{k_x^2 + k_y^2} = \sqrt{\epsilon\mu_v} k_0$ 。因此,对于一个给定的频率, $k_x$ 和 $k_y$ 只存在离散的解,导致MYYM结构中存在不同阶数的束缚模式,最低阶的束缚模式如图2(a)中的黑色虚线所示(本文只讨论低频部分的束缚模式)。显然,当色散曲线 $\omega_b$ 区域的截止频率 $\omega_{b,cf}$ 小于最低阶的束缚模式的截止频率 $\omega_{cf}$ 时,一个新的光子带隙出现了,即 $[\omega_{b,cf}, \omega_{cf}]$ ;此时,该带隙支持电磁波前向和后向传播。

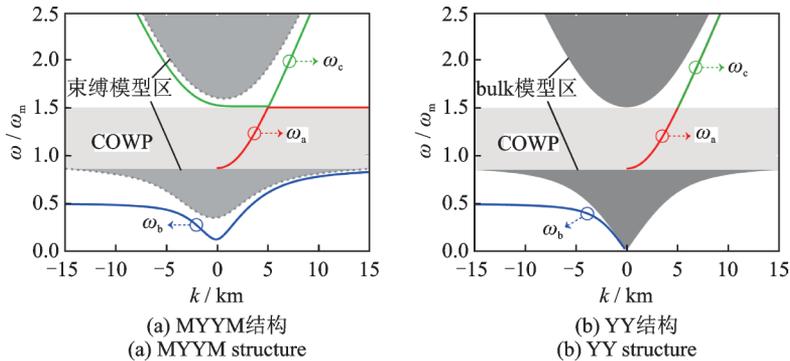


图2 MYYM结构与YY结构中的色散曲线

Fig. 2 Dispersion curves in MYYM structure and YY structure

## 2 基于磁畴壁的超宽带单向传播带

与YY结构相同,MYYM结构同样存在完全单向传播带(Complete one-way propagation, COWP),位于YIG固有的光子带隙即 $\omega_a$ 区域。在MYYM和YY结构中,COWP带位于 $\left[\sqrt{\omega_0(\omega_0 + \omega_m)}, \omega_0 + \omega_m\right]$ ,即 $[0.87\omega_m, 1.5\omega_m]$ ,如图2中 $\omega_a$ 区域所示。由第1小节的分析可知,有限的YIG厚度带来新的光子带隙 $[\omega_{b,cf}, \omega_{cf}]$ 。减小YIG厚度, $\omega_{cf}$ 增大,导致光子带隙相应增大。继续减小YIG厚度使得 $\omega_{cf}$ 大于渐进频率 $\omega_{sp}^-$ ,此时在 $[\omega_{sp}^-, \omega_{cf}]$ 区间可能会出现单向电磁模式。为了与固有带隙的COWP带区分开,本文把可能出现的新单向区间命名为COWP2,对应固有带隙的COWP带为COWP1。为了验证上述分析,数值计算了MYYM结构在 $d=7.8\text{ mm}$ 和 $d=3\text{ mm}$ 两种厚度下的色散曲线,结果分别如图3(a)和图3(b)所示。与理论分析一致,一个单向传播频带COWP2出现在新的光子带隙区域,COWP2的上限由 $\omega_{cf}$ 决定,下限为 $\omega_{sp}^-$ 。当 $d=7.8\text{ mm}$ 时, $\omega_{cf}$ 为 $0.62\omega_m$ ,对应COWP2带宽为 $0.12\omega_m$ ,此时单向工作频带为 $[0.5\omega_m, 0.62\omega_m]$ 和 $[0.87\omega_m, 1.5\omega_m]$ ;当 $d=3\text{ mm}$ 时, $\omega_{cf}$ 为 $0.82\omega_m$ ,对应COWP2带宽为 $0.32\omega_m$ ,此时单向工作频带为 $[0.5\omega_m, 0.82\omega_m]$ 和 $[0.87\omega_m, 1.5\omega_m]$ 。COWP2的带宽随 $d$ 的减小而增大,直到 $\omega_{cf}$ 达到 $0.87\omega_m$ ,此时COWP2带宽增大,为 $0.37\omega_m$ ,此时单向工作频带为 $[0.5\omega_m, 1.5\omega_m]$ 。此外,从图3还可以看出,当YIG厚度的减小到一定程度时, $\omega_c$ 区域不存在任何电磁模式。

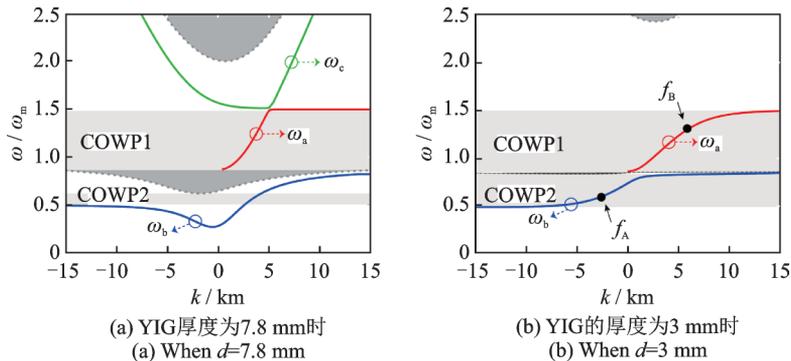


图3 MYYM结构中不同厚度下的色散曲线

Fig. 3 Dispersion curves in YMMY structure with different YIG thicknesses

## 3 仿真验证

在YY结构中,由于电磁波的光子能量集中在体模式区域,其低频部分即 $\omega_b$ 区域的色散分支不能支持单向传播。相反,本文的MYYM结构移除了体模式的影响,出现了新的光子带隙并且支持单向模式传播。为了验证上述分析中的单向模式,使用有限元法(Finite element method, FEM),运用Comsol Multiphysics仿真软件模拟了电磁波在MYYM结构中的传播。模拟系统的基本物理常数如下: $d=3\text{ mm}$ , $\nu=0.001$ 和 $\omega_0=0.5\omega_m$ , $\omega_m=10\pi \times 10^9\text{ rad/s}$ 。在波导中设置面外电流源来激发单向模式,其工作频率分别为图3(b)中标出的A和B点,其中 $f_A=3.5\text{ GHz}$  ( $\omega_A=0.7\omega_m$ ), $f_B=6.5\text{ GHz}$  ( $\omega_B=1.3\omega_m$ )。为了检验单向模式是否能免疫散射,还在波导中放置了边长为2 mm的空气块作为障碍物,并模拟了其仿真结果。空气块放置在距离源40 mm的磁畴壁上,其中心位于 $x=80\text{ mm}$ , $y=0\text{ mm}$ 处,仿真结果如图4所示。图4(a)为工作频率 $f_A$ 时的电场模拟仿真图,可以明显看出,电磁波只能向前传

播。图4(b)显示,在这个频率下电磁波可以完全无损地绕过障碍物继续向前传播,并且在激励源的左侧没有任何背向传输的模式。图4(c)和4(d)为频率 $f_B$ 的电场模拟仿真图,其结果与4(a)和4(b)类似,该频率下的电磁波为完全单向传播且免疫散射。

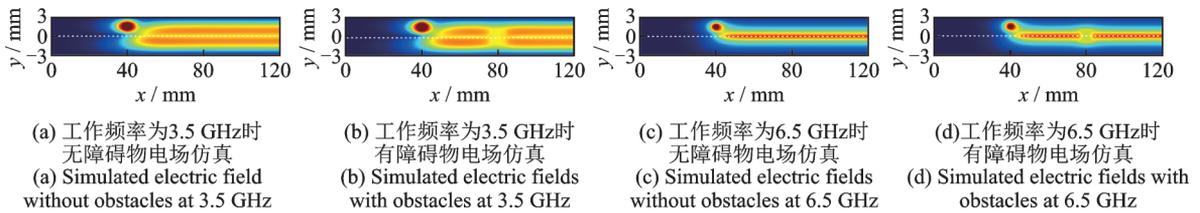


图4 MYYM结构中不同频率下的电场仿真

Fig. 4 Simulated electric fields in MYYM structure at different operating frequencies

## 4 结束语

本文基于磁光材料的磁畴壁,提出一个由金属-YIG-YIG-金属构成的新型单向波导。理论分析和数值计算结果表明,随着YIG厚度减小,该波导系统中出现一个新的光子带隙。与YIG的固有光子带隙一样,该光子带隙仍然支持单向电磁模式。仿真结果进一步表明,两个光子带隙支持的单向电磁模式都是完全单向模式,可以免疫粗糙表面散射和背向反射。与YIG-YIG结构相比,引入的金属层压缩了磁光材料的体模式,导致波导的单向工作频带明显增大,并且有限的介质层厚度更符合实际应用。该波导系统具有结构简单,免疫散射及超宽单向工作频带等优点,是实现全光子集成电路的有效途径。

## 参考文献:

- [1] Raghu S, Haldane F D M. Analogs of quantum Hall effect edge states in photonic crystals[J]. *Physical Review A*, 2006, 78(3): 1-24.
- [2] Takeda H, John S. Compact optical one-way waveguide isolators for photonic-band-gap microchips[J]. *Physical Review A*, 2008, 78(2): 3674-3690.
- [3] Yu Z, Wang Z, Fan S. One-way total reflection with one-dimensional magneto-optical photonic crystals[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(12): 426-124.
- [4] Tsakmakidis K L, Shen L, Schulz S A, et al. Breaking Lorentz reciprocity to overcome the time-bandwidth limit in physics and engineering[J]. *Science*, 2017, 356(6344): 1260-1264.
- [5] Shen L, Zheng X, Deng X. Stopping terahertz radiation without backscattering over a broad band[J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 11790-11798.
- [6] Shen L, You Y, Wang Z, et al. Backscattering-immune one-way surface magnetoplasmons at terahertz frequencies[J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 950-962.
- [7] 董建绩, 廖莎莎, 郑傲凌, 等. 基于集成光波导的超快光子微积分运算研究进展[J]. *数据采集与处理*, 2014, 29(6): 849-858.  
Dong Jianji, Liao Shasha, Zheng Aoling, et al. Review of ultrafast photonic differentiator and integrator employing integrated waveguides[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2014, 29(6): 849-858.
- [8] 潘时龙, 张亚梅. 偏振调制微波光子信号处理偏振调制微波光子信号处理[J]. *数据采集与处理*, 2014, 29(6): 874-884.  
Pan Shilong, Zhang Yamei. Polarization modulated microwave photonic signal processing[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2014, 29(6): 874-884.
- [9] Wang Z, Chong Y, Joannopoulos J D, et al. Observation of unidirectional backscattering-immune topological electromagnetic states[J]. *Nature*, 2009, 461(7265): 772-775.
- [10] Wang Z, Chong Y D, Joannopoulos J D, et al. Reflection-free one-way edge modes in a gyromagnetic photonic crystal[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(1): 1-4.

- [11] Liu S, Lu W, Lin Z, et al. Molding reflection from metamaterials based on magnetic surface plasmons[J]. *Physical Review B*, 2011, 84(4): 1-10.
- [12] Jiang C, Zhu H. Broadband unidirectional electromagnetic mode at interface of anti-parallel magnetized media[J]. *Optics Express*, 2010, 18(7): 6914-6921.
- [13] Zhang X, Li W, Jiang X. Confined one-way mode at magnetic domain wall for broadband high-efficiency one-way waveguide, splitter and bender[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(041108): 1-4.
- [14] Yu Z, Veronis G, Wang Z, et al. One-way electromagnetic waveguide formed at the interface between a plasmonic metal under a static magnetic field and a photonic crystal[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(2): 1-4.
- [15] Hu B, Wang Q J, Zhang Y. Broadly tunable one-way terahertz plasmonic waveguide based on nonreciprocal surface magneto plasmons[J]. *Optics letters*, 2012, 37(11): 1895-1897.
- [16] Shen Q, Hong L, Deng X, et al. Completely stopping microwaves with extremely enhanced magnetic fields[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 15811.
- [17] Hartstein A, Burstein E, Maradudin A A, et al. Surface polaritons on semi-infinite gyromagnetic media[J]. *Journal of Physics C*, 1973, 6(7): 1266-1276.

#### 作者简介:



沈谦(1994-), 通信作者, 女, 博士研究生, 研究方向: 单向波导及其微型化应用, E-mail: qianshen@email.ncu.edu.cn。



沈林放(1965-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 单向波导及其微型化应用。



沈云(1980-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 光子微结构物理效应及器件、太赫兹物理。



尤运(1990-), 男, 硕士, 研究方向: 单向波导及其微型化应用。



邓晓华(1963-), 通信作者, 男, 博士, 教授, 研究方向: 空间物理、太赫兹物理, E-mail: dengxh@ncu.edu.cn。

(编辑: 王静)