

# 外加偏置磁场对静磁波模式及其频带的影响

武保剑, 孙维勇, 史双瑾, 陈福深, 邱 昆

(电子科技大学宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室, 四川成都 610054)

**摘 要:** 本文完整地展现了磁光薄膜中任意倾斜的外加直流偏置磁场对微波静磁波激发模式及其带宽的影响, 实现了对不同静磁模的统一考虑, 为进一步分析磁光 Bragg 器件的衍射性能提供理论基础. 计算分析表明: (1) 当外加偏置磁场的大小不变时, 传统磁化情形下的静磁波带宽最大, 此时基于静磁反向体波 (MSBVW) 的磁光 Bragg 器件较相应的静磁正向体波 (MSFVW) 器件有更高的工作频率; (2) 在适当倾斜的偏置磁场作用下, MSBVW、MSFVW 和静磁表面波 (MSSW) 均可被激发, 它们的激发频率依次增大; (3) 通过倾斜偏置磁场可使 MSFVW 的频带向高频移动.

**关键词:** 静磁波; 偏置磁场; 磁光薄膜; Bragg 器件

**中图分类号:** O482.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 11-2198-03

## Dependence of Magnetostatic Wave Modes and Bandwidth on External Bias Magnetic Fields

WU Bao-jian, SUN Wei-yong, SHI Shuang-jin, CHEN Fu-shen, QIU Kun

(Key Laboratory of Broad Optical Fiber Transmission and Communication Networks UEST of China, Ministry of Education, Chengdu, Sichuan 610054, China)

**Abstract:** The dependence of magnetostatic wave (MSW) modes and its bandwidth on the external DC bias magnetic fields in the magneto-optic film was illustrated. Three kinds of magnetostatic modes, those of the magnetostatic backward volume wave (MSBVW), the magnetostatic forward volume wave (MSFVW) and the magnetostatic surface wave (MSSW), were taken into account together by studying the generation of the magnetostatic waves under arbitrarily tilted bias magnetic field, and then the diffraction performance of the MSW-based magneto-optic Bragg cells may easily be calculated. Our calculation shows that, (1) for the same magnitude of external bias magnetic fields, in the conventional magnetization directions there is the largest MSW bandwidth and the operating frequency of the MSBVW-based Bragg cell is higher than that of the MSFVW-based Bragg cell, (2) under an appropriately inclined bias magnetic field, all three magnetostatic modes can respectively be excited at higher and higher frequencies, and (3) the MSFVW bandwidth may move to higher frequencies by tilting the external bias magnetic field.

**Key words:** magnetostatic wave; bias magnetic field; magneto-optic film; Bragg cell

## 1 引言

静磁波是一种在磁性介质波导中传播的准静电磁波, 其传播速度比真空中光速低几个数量级, 通过改变偏置磁场可控制静磁波传播速度, 制成多种静磁波微波器件. 与表面声波器件相比, 静磁波器件具有传播损耗小, 载波频率范围大等许多优点. 静磁波还可与导波光发生作用, 导致导波光的模式转换或衍射效应, 利用这一原理可做成频谱分析器、光调制器和光偏转器等新型磁光波导器件, 并可望在光通信、光信息处理和激光雷达等领域获得广泛应用<sup>[1]</sup>. 对应于外加偏置磁场和静磁波传播方向之间的不同配置情形, 在磁性薄膜波导中

可激发静磁正向体波 (MSFVW)、静磁反向体波 (MSBVW) 以及静磁表面波 (MSSW) 等三种模式. 因此, 当激发静磁波的波导结构确定后, 适当改变外加偏置磁场方向可得到不同模式的静磁波. 通过研究任意倾斜的偏置磁场情形下静磁波的激发特性, 不但可以比较不同静磁模的工作频带对偏置磁场的依赖, 还可以更方便地将三种静磁模统一起来考虑, 甚至研究混合模式的静磁波特点, 这种处理方法在研究静磁波与导波光的相互作用时更具优势. 理论<sup>[2]</sup>与实验<sup>[3]</sup>均表明, 采用适当斜向偏置磁场方法是提高基于静磁波的磁光 Bragg 器件衍射效率的有效方法之一, 因此研究外加倾斜偏置磁场对微波静磁波器件的工作模式、频率及其带宽等特性的影响具

有重要意义.

## 2 内外偏置磁场关系与静磁势

将 GGG 衬底上外延生长的 YIG 薄膜置于自由空间,从而组成三层介质波导结构,微带线变换器紧贴 YIG 薄膜表面,用于激发沿  $Y$  轴正向或负向传播的静磁波(在  $X$  方向分布均匀).YIG 薄膜内部和外部的 DC 偏置磁场  $H_i$  和  $H_e$  的方向可用其偏离  $Z$  轴的夹角及其在  $XOY$  平面的投影与  $X$  轴的夹角表示,即分别为  $(\theta_i, \phi_i)$  和  $(\theta_e, \phi_e)$ ,如图 1 所示.饱和磁化时,考虑到表面退磁场的作用后,内外 DC 偏置磁场有如下关系:

$$H_i \sin \theta_i = H_e \sin \theta_e, (H_i + M_s) \cos \theta_i = H_e \cos \theta_e, \phi_i = \phi_e = \phi \quad (1)$$

式中  $M_s$  为 YIG 磁光薄膜的饱和磁化强度.

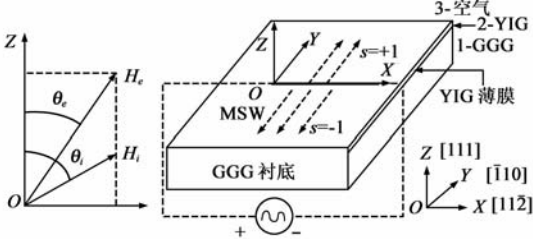


图 1 置于自由空间的 YIG 薄膜波导结构

磁性薄膜内的交变磁化强度  $m$  和交变磁感应强度  $b$  与交变磁场  $h$  的关系为

$$m = \chi \cdot h, b = \mu_0 \mu_r \cdot h \quad (2)$$

式中磁化率张量  $\chi$  可由垂直薄膜磁化时的磁化率张量旋转得到,它与内部磁场  $H_i$  和静磁波频率  $f$  直接相关,  $\mu_r = I + \chi$  为相对磁导率张量,  $I$  为单位矩阵.在静磁近似下,  $h$  可用静磁标量势  $\Psi$  表示,即  $h = \nabla \Psi$ ,  $\Psi$  可表示为如下形式:

$$\Psi_j = \int_{-\infty}^{\infty} [A_j \exp(\alpha_j z) + B_j \exp(\beta_j z)] \exp[i(\omega t - ky)] dk \quad (3)$$

其中  $j=1,2,3$  分别对应于 GGG 衬底、YIG 薄膜和空气介质;  $k$  可取正值或负值,分别表示静磁波沿  $Y$  轴正向和反向传播.对于磁性介质( $j=2$ ),有

$$\alpha_2 = ik \frac{(\mu_{23} + \mu_{32}) + s\sqrt{\Delta}}{2\mu_{33}}, \beta_2 = ik \frac{(\mu_{23} + \mu_{32}) - s\sqrt{\Delta}}{2\mu_{33}} \quad (4)$$

其中  $\Delta = (\mu_{23} + \mu_{32})^2 - 4\mu_{22}\mu_{33}$ ,  $\mu_{ij}$  ( $i, j=2,3$ ) 为  $\mu_r$  的分量元素,  $s = \pm 1$  分别表示静磁波沿  $Y$  轴正向和反向传播.至此可知,  $h$  与  $b$  是坐标  $y, z$  及  $k$  的函数.结合图 1 所示的波导结构,根据  $h$  和  $b$  应满足的边界条件可得静磁波波矢  $k$  满足的色散本征方程为:

$$e^{(\alpha_2 - \beta_2)d} = \frac{(\alpha - s \cdot k)(\beta + s \cdot k)}{(\alpha + s \cdot k)(\beta - s \cdot k)} \quad (5)$$

其中  $d$  为 YIG 薄膜厚度,  $\alpha = -ik\mu_{32} + \alpha_2\mu_{33}$ ,  $\beta = -ik\mu_{32}$

+  $\beta_2\mu_{33}$ . 同时还可以确定系数  $A_j, B_j$ , 并由式(2~4)可得到磁性薄膜中静磁波交变磁化强度  $m$  (在定量计算微波静磁波对导波光的衍射效率时将用到它).一般地,当  $\alpha_2, \beta_2$  为实数或虚数时分别对应于静磁表面波或静磁体波.

## 3 静磁波模式及其带宽分析

下面根据  $\Delta$  的正负以及色散方程式(5)有解的条件来讨论静磁体波(MSVW)和静磁表面波(MSSW)的带宽范围.定义归一化磁场频率  $\Omega_H = H_i/M_s$  和归一化静磁波频率  $\Omega = 2\pi f/(\gamma M_s)$ ,  $\gamma$  为旋磁比.

对于静磁体波(MSVW),应有  $\Delta \geq 0$ , 则可得静磁体波的归一化频率  $\Omega_V$  范围为  $\sqrt{\Omega_H^2 + \Omega_H \cos^2 \phi \sin^2 \theta_i} \leq \Omega_V \leq \sqrt{\Omega_H^2 + \Omega_H}$ . 可以证明,此时总有满足色散方程的静磁体波波矢  $k$  存在.通过计算静磁波色散方程,还可对静磁体波频带进一步细分为:静磁反向体波(MSBVW)的归一化频率  $\Omega_{BV}$  范围为  $F_1 \leq \Omega_{BV} \leq F_2$ , 其中  $F_1 = \sqrt{\Omega_H^2 + \Omega_H \cos^2 \phi \sin^2 \theta_i}$ ,  $F_2 = \sqrt{\Omega_H^2 + \Omega_H \sin^2 \theta_i}$ ; 静磁正向体波(MSFVW)的归一化频率  $\Omega_{FV}$  范围为  $F_2 \leq \Omega_{FV} \leq F_3$ , 其中  $F_3 = \sqrt{\Omega_H^2 + \Omega_H}$ .

对于静磁表面波(MSSW),应有  $\Delta < 0$ , 并且满足色散方程式(5),即  $k$  存在非零解.据此可知,当  $\Omega_H \leq \frac{\cos^2 \phi \sin^2 \theta_i}{1 - \cos^2 \phi \sin^2 \theta_i}$  (临界条件)时, MSSW 归一化频率  $\Omega_S$  范

围为  $F_3 < \Omega_S < F_4$ , 其中  $F_4 = \frac{\Omega_H + (\Omega_H + 1) \cos^2 \phi \sin^2 \theta_i}{2|\cos \phi \sin \theta_i|}$ .

## 4 计算与讨论

(1) 平行于薄膜平面磁化时( $\theta_e = 90^\circ$ ),可激发 MSBVW 和 MSSW. 由临界条件知  $\Omega_H \leq \cot^2 \phi$ , MSSW 存在于  $|\phi| \leq \cot^{-1} \sqrt{\Omega_H}$  或  $|\phi| \geq \pi - \cot^{-1} \sqrt{\Omega_H}$  ( $\phi \in [-\pi, \pi]$ ), 所得结果与文献[4]完全一致.需指出的是,本文给出的 MSSW 归一化频率上限具有更简洁的表达形式.垂直于静磁波传播方向磁化( $\phi = 0$ )时,可激发 MSFVW 和 MSSW.垂直于  $X$  轴的平面内磁化( $\phi = 90^\circ$ )时,可激发 MSBVW 和 MSFVW.同时可知, MSFVW 带宽只与  $\theta_i$  有关,与  $\phi$  角无关.

(2) 为了直观地表示静磁波模式及其频带范围对偏置磁场方向的依赖关系,本文计算了外加偏置磁场  $H_e = 30000e$  时静磁波的模式图(YIG 饱和磁化强度取 1750Gs),如图 2 所示.可以看出,传统偏置磁场情形下即在坐标轴方向磁化时, MSFVW、MSBVW 和 MSSW 的激发频率依次增大(外加磁场大小相同);当  $\theta_e$  从 0 增加到  $90^\circ$  时,三种静磁模的频率上/下限都会增加, MSFVW 的带宽会逐渐减小;当  $\phi$  从开始增加时, MSSW 的带宽

会急剧减小.在适当倾斜的外加 DC 偏置磁场作用下,三种模式的静磁波均可被激发,但它们对应不同的微波电流频率,如图 2(b)所示.

(3)对于传统的偏置磁场情形,上述静磁波频率范围的一般表达式还可进一步简化,所得结果与文献<sup>[5]</sup>相同,此时静磁波具有最大的模式带宽(参见图 2).

## 5 结论

本文完整地展现了外加偏置磁场对微波静磁波模式及其频带范围的影响,对理论和实验研究静磁波器件以及不同模式的静磁波对导波光的衍射作用具有重要意义.在同样大小的外加偏置磁场作用下,基于 MSBVW 的 Bragg 器件较基于 MSFVW 的 Bragg 器件有更高的 RF 工作频率,何况它们分别工作在相应磁光带宽的高频端和低频端;而对于基于 MSSW 的磁光 Bragg 器件可望工作在更高的频段,详细情况有待进一步研究.

## 参考文献:

- [1] Tsai C S, Young D. Magnetostatic-forward-volume-wave-based guided-wave magneto-optic Bragg cells and applications to communications and signal processing[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1990, MTT-38(5):560-570.
- [2] Wu Baojian, Liu Gongqiang, Zou Zhiqiang. Mode conversion and diffraction of guided optical waves from magnetostatic waves under inclined bias field[J]. Commun Theor Phys, 2001, 36(4):497-502.
- [3] Kolokoltsev O V, Vountesmeri V. Optimization of MO Bragg diffraction of guided optical waves by MSW in YIG films by using inclined magnetic bias field[J]. Journal of Magnetism and

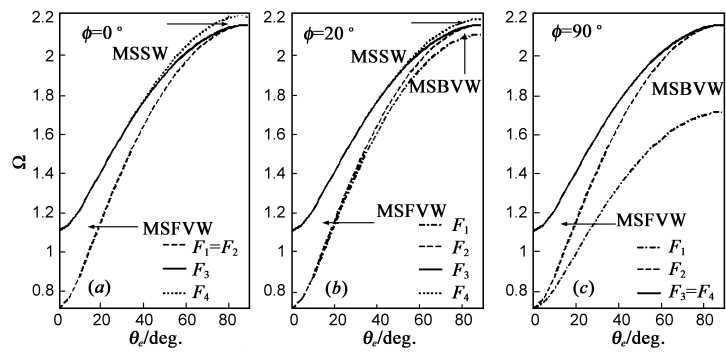


图 2  $H_e=3000\text{Oe}$  时静磁波归一化频率  $\Omega$  对外加偏置磁场方向的依赖

Magnetic Materials, 2001, 225:394-402.

- [4] Ando Y, Ning Guan, Yashiro K, et al. An analysis of excitation of magnetostatic surface waves in an in-plane magnetized YIG film by the integral kernel expansion method[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2003, MTT-51(2):492-499.
- [5] Tsai C S. Magnetostatic waves-based integrated magneto-optic Bragg cell devices and applications[J]. IEEE Trans Magn, 1996, MAG-32(5):4118-4123.

## 作者简介:



武保剑 男,1970 年 1 月生.1999 年博士毕业于上海交通大学,现为电子科技大学副教授,发表论文近 40 篇.主要研究方向:微波光电子、光通信等. E-mail:bjwu@uestc.edu.cn

孙维勇 男,1960 年 5 月生,高级工程师.主要从事光电子技术方面的研究.

史双瑾 男,1969 年 9 月生,讲师.主要从事光通信方面的教学和科研工作.