

实用化静磁表面波带通滤波器研究

杨青慧, 刘颖力, 张怀武, 石玉

(电子科技大学 微电子与固体电子学院, 四川 成都 610054)

摘要:根据静磁表面波的基本理论建立了静磁表面波带通滤波器的设计模型,以实用化的静磁表面波带通滤波器为目标,重点考虑了静磁表面波带通滤波器的中心频率与带宽控制问题.依据模型对滤波器进行了设计、制作和测试.实际制作的滤波器性能指标为:中心频率调谐范围为4.2~5.2GHz,3dB带宽180MHz±6MHz,插损11dB左右,带外抑制大于30dB,与理论设计结果基本一致,从而得到了实用化静磁表面波静磁波带通滤波器的原形.进一步提高器件的中心调谐频率,在毫米波段将有广阔的发展前景.

关键词:静磁表面波;滤波器;换能器;YIG薄膜

中图分类号:TN451 **文献标识码:**A

STUDY ON PRACTICAL MAGNETO-STATIC SURFACE WAVE BAND-PASS FILTER

YANG Qing-Hui, LIU Ying-Li, ZHANG Huai-Wu, SHI Yu

(School of Microelectronics and Solid-State Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: The designing model of magneto-static surface wave (MSSW) band-pass filter was established according to the MSSW fundamental theory. Based on the model and putting emphasis on center frequency and bandwidth control, the filter was devised, made and tested with the view of practical MSSW filter. The performance of the filter manufactured is in accordance with the theoretical designing with center frequency from 4.2GHz~5.2GHz, bandwidth 180MHz±6MHz at level-3dB, insertion loss 11dB and suppression of side bands more than 30dB. Thus, the practical MSSW filter prototype has been obtained. By raising the center frequency further, the technique will have broad prospect in the millimeter bands.

Key words: magneto-static surface wave; filter; transducer; YIG film

引言

随着微波通讯、雷达系统的发展,对系统灵敏度、带宽及实时处理等功能的要求越来越高,从而对信号处理器件和微波铁氧体材料的要求也越来越高.当工作频率达到微波高频段时,常规采用的数字技术或SAW器件已很难满足需要,这时采用模拟技术的静磁波器件就将发挥其独特的作用.静磁波器件具有工作频率高、高频损耗低、换能器尺寸适当、可磁控、体积小、重量轻且性能可靠性较高、外围电路简单等优点,所以静磁波器件在军事领域深受瞩目.本文静磁表面波滤波器的研究正是适应这一发展趋势而进行的.

1 静磁表面波在磁介质中的传播特性及换能器基本性质

1.1 静磁表面波的色散特性

静磁波是自旋波的长波部分,其能量主要是磁能,电场能量可以忽略不计.由其激励方式和色散特性的不同静磁波可分为3种:静磁表面波(MSSW),静磁前向体波(MSFVW)和静磁反向体波(MSBVW).其中MSSW由于其易激发、损耗小,得到了广泛的应用.其激励模型和色散特性如图1所示,色散方程^[1-3]如下:

$$\omega^2 = \omega_H(\omega_H + \omega_M) + \frac{\omega_M^2}{2(1 + \tanh^{-1}(kt))} \quad (1),$$

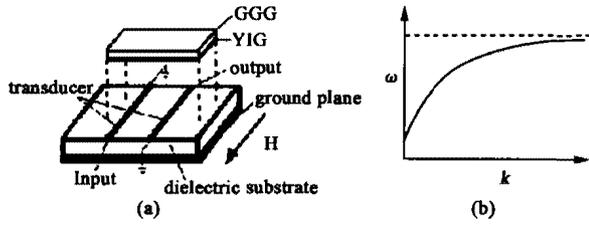


图1 静磁表面波的激励模型和色散曲线示意图 (a) 传输静磁表面波的基本条件 (b) 静磁表面波的色散曲线示意图
 Fig. 1 MSSW excitation model and dispersion schematic diagram (a) Fundamental diagram of MSSW dispersion (b) Schematic diagram of MSSW dispersion

其中 $\omega_H = 2\pi\gamma H$, $\omega_M = 2\pi\gamma M_s$, γ 为旋磁比, H 为内偏置场, $\gamma = 2.8\text{MHz/Oe}$, t 为 YIG 膜厚度. 从色散方程可以很容易的得到传播中的频率限制:

当 $k \rightarrow 0$ 时, $\omega = \sqrt{\omega_H(\omega_H + \omega_M)}$,
 当 $k \rightarrow \infty$ 时, $\omega = \omega_H + \frac{1}{2}\omega_M$,

所以静磁表面波的理论频段为 $\sqrt{\omega_H(\omega_H + \omega_M)} < \omega < \omega_H + \frac{\omega_M}{2}$.

1.2 换能器

静磁波的激励由换能器的辐射电阻^[4-7]表征, 微带换能器一般有四种类型 (1) 单条换能器 (2) 多条换能器 (3) 叉指换能器 (4) 曲折线换能器. 其中单条换能器由于其激励频带宽、设计简单, 得到了广泛的应用.

设换能器的宽度为 $2w$, 忽略其厚度, 沿 y, z 方向 YIG 膜尺寸可看作无穷大, 假设外偏置磁场方向与 z 轴成 θ 角, 当 θ 为 0 时, 激励的静磁波模式为静磁表面波 (MSSW), 沿 $\pm y$ 方向传播. 如图 2 所示: 假设静磁近似成立, 时域因子为 $e^{j\omega t}$, 则 YIG 膜的张量磁导率为

$$\vec{\mu}_r = \begin{bmatrix} \mu_1 & -j\mu_2 & 0 \\ j\mu_2 & \mu_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

这里 $\mu_1 = 1 + \frac{\omega_M\omega_H}{\omega_H^2 - \omega^2}$, $\mu_2 = \frac{\omega\omega_M}{\omega_H^2 - \omega^2}$, $\omega_H = 2\pi\gamma M_s$, H ,

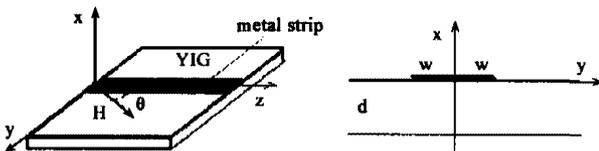


图2 换能器模型
 Fig. 2 Transducer model

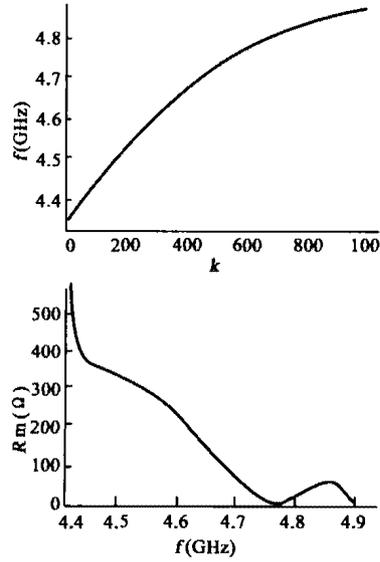


图3 色散曲线和辐射电阻的理论模拟曲线
 Fig. 3 Dispersion curve and the theory simulation curve of radiation resistance

M, ω, γ 分别为偏置场的场强、YIG 膜的饱和磁化强度、角频率和旋磁比. 由于磁场的切向分量和磁通密度的法向分量是连续的, 可以得到沿微带的电流密度 $J_z(y)$ 和在 $x = 0$ 平面上的磁通密度 $B_x(y)$ 的关系, 作波数 k 的傅立叶变换:

$$\vec{B}_x(k) = j\mu_0 G(k) \vec{J}_z(k), \quad (3)$$

$$\text{式(3)中 } G(k) = -s [(\mu_1 - \mu_2 s)(\mu_1 + \mu_2 s + 1) - (\mu_1 + \mu_2 s)(\mu_1 - \mu_2 s - 1)e^{-2|k|d}], \quad (4)$$

$$/ [(\mu_1 - \mu_2 s + 1)(\mu_1 + \mu_2 s + 1) - (\mu_1 + \mu_2 s - 1)(\mu_1 - \mu_2 s - 1)e^{-2|k|d}]$$

$s = \frac{k}{|k|}$, 利用傅立叶反变换, 并假设在换能器内 B_x

(y) = 0, 即在 $-w \leq y \leq w$, 有如下等式成立:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} G(k) \vec{J}_z(k) e^{-jk_y} dk = 0, \quad (5)$$

下面来求解方程式(3): e^{-jk_y} 可以展开成^[8]

$$e^{-jk_y} = \sum_{m=0}^{\infty} (-j)^m (2m+1) j_m(k\omega) P_m\left(\frac{y}{w}\right), \quad (6)$$

把式(6)带入式(5)可以得到

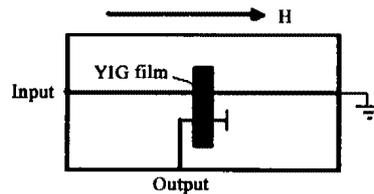


图4 滤波器的结构示意图
 Fig. 4 The filter framework schematic diagram

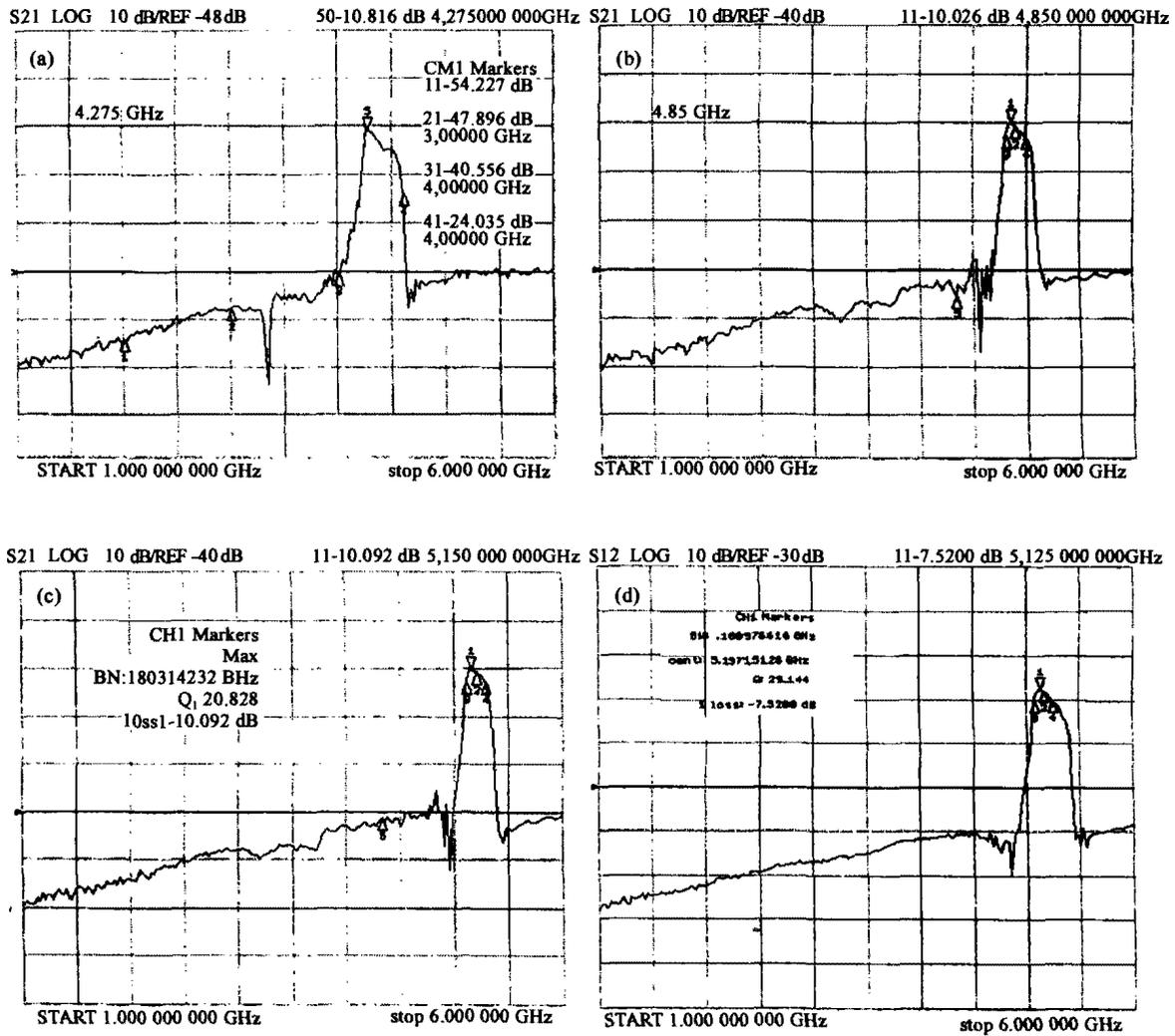


图5 滤波器测试结果(a)中心频率4.275GHz (b)中心频率4.85GHz (c)中心频率5.15GHz (d)中心频率5.197GHz,带宽180MHz

Fig.5 The test results of the filter (a)center frequency 4.275GHz (b)center frequency 4.85GHz (c)center frequency 5.15GHz (d)center frequency 5.197GHz, bandwidth 180MHz

$$\int_{-\infty}^{+\infty} G(k) \bar{J}_z(k) j_m(k\omega) dk = 0, \quad (7)$$

可以把未知函数 $J_z(y)$ 展开成:

$$J_z(y) = (1 - \frac{y}{w})^\alpha (1 + \frac{y}{w})^\beta \sum_{n=0}^{\infty} a_n P_n^{(\alpha,\beta)}(\frac{y}{w}), \quad (8)$$

这里 $P_n^{(\alpha,\beta)}(z)$ 是需确定的未知系数. 当前我们取 $\alpha = \beta = \frac{1}{2}$, 因为选择这些条件, 方程式(8)满足边界条件.

由坡印亭矢量, 单位长度的平均能流密度为

$$P_{\pm} = -\frac{2\pi^2 \mu_0 w | \bar{J}_z |^2}{k_{\pm} D'}$$

$$\left[\begin{aligned} & -\frac{U^- S_+ - U^+ S_- e^{-2ik_{\pm}d}}{2|k_{\pm}|} + (U^- S_+^2 + U^+ S_-^2 e^{-2ik_{\pm}d}) \\ & \times \frac{1 - e^{-2ik_{\pm}d}}{2|k_{\pm}|} + 2\mu_2 S_+ S_- e^{-2ik_{\pm}d} + 4\mu^2 \frac{e^{-2ik_{\pm}d}}{2|k_{\pm}|} \end{aligned} \right], \quad (9)$$

式(9)中 $S_{\pm} = \mu_1 \pm \mu_2 s \pm 1, U^{\pm} = \mu_1 \pm \mu_2 s$, 总电流可由公式(8)直接对换能器积分得到. 所以换能器的色散电阻通过式(10)^[9,10]求得

$$R_m = \frac{2(P_+ - P_-)}{|I|^2}, \quad (10)$$

我们可以由式(10)模拟辐射电阻与频率的关系, 辐射电阻的半高宽即为器件的3dB带宽, 所以我们可以根据辐射电阻建立带宽与微带宽度的关系, 为我们设计器件提供了依据.

2 静磁表面波滤波器的设计及制作

滤波器要求的技术参数是:滤波器中心频率在范围 4.1~5.1GHz 内可调;插损小于 11dB;3dB 带宽为 180 ± 10 MHz;带外抑制大于 30dB. 由于单条换能器结构简单、换能效率高、模型简单、所以采用单条换能器;

采用的 YIG 薄膜的饱和磁化强度 $4\pi M_s = 1750$ Gs, $\Delta H = 0.50$ e, 膜厚 $t = 9.1$ μ m; Al_2O_3 介质基片厚度 $d = 450$ μ m; 根据(10)式反复计算,确定选用换能器宽度 $w = 295$ μ m, 该微带换能器一方面构成了特性阻抗为 75 Ω 传输线便于匹配,另一方面激励静磁表面波的带宽可控制在目标范围;磁场采用钇—钴磁体,使用磁分路器,使磁场在 800~1000 Oe 内可调. 当磁场强度 $H = 900$ Oe 时,其 $\omega \sim k$ 和辐射电阻的模拟曲线分别如图 3 所示:

由图 3 可知设计计算的辐射电阻半高宽(3dB 带宽)为 190MHz. 通过调节偏置磁场方向控制其带宽为 180MHz,通过调节磁分路器改变磁场大小(磁场可在 800~1000 Oe 之间调节),使滤波器的中心频率在 4.2GHz~5.2GHz 内调谐.

滤波器的结构示意图如图 4 所示,在电介质基片上两组微带换能器分别为输入换能器和输出换能器, YIG 薄膜材料紧贴贴在换能器的表面. 在输入换能器的始端加 $\lambda/4$ 匹配,并在末端加匹配电阻以减小反射;在输出换能器的末端加匹配电阻.

3 实验结果及分析

采用 Agilent 8722ES 矢量网络分析仪对器件进行测试,测试结果如图 5 所示:

从测试曲线可以看到,滤波器的带宽为 180MHz,与前面的设计结果基本一致;中心频率可以从 4.2GHz~5.2GHz 进行调谐,由特殊的磁场结构并通过磁分路器调节磁场的强弱来实现,由于磁场大小的偏差,使中心频率有所偏移;带外抑制也基本达到了器件指标要求;由于器件输入换能器终端的匹配还不太理想,造成器件的插入损耗测试值不够稳定,一般在 10dB~12dB 之间,尚需进一步改善.

4 结语

本文根据静磁表面波的基本理论,建立了静磁表面波带通滤波器设计模型,根据模型并结合器件目标参数进行理论设计与计算,得到了器件结构参

数如换能器微带宽度、偏置磁场大小等参数,并设计了器件的布局及结构. 该结构能容易地实现偏置磁场强弱及方向的调节以调整控制滤波器的 3dB 带宽及中心频率的调谐. 根据设计结果进行实际制作和测试,实验结果与理论设计基本吻合,证明了所提出的设计方案是科学合理的.

最终研制的静磁表面波带通滤波器参数为:3dB 带宽为 180 ± 6 MHz;中心频率在 4.2GHz~5.2GHz 可调,插损 10~12dB,带外抑制大于 30dB,基本接近实用化器件的雏形. 通过进一步的优化和完善,将使静磁表面波带通滤波器的实用化成为可能.

REFERENCES

- [1] Sethares J C, Weinberg I J. Theory of MSW transducer [J]. *Circuit System Signal Process*, 1985, 4: 41—44.
- [2] Sethares J C. Magneto-static surface wave transducers [J]. *IEEE Trans. On MTT*, 1979, 27(11): 902—907.
- [3] O'Keefe T W, Patterson R W. Magneto-static surface wave propagation in ferrite samples [J]. *J. Appl. Phys*, 1978, 49: 4886—4890.
- [4] Adkins L R, Glass H L. Propagation of magneto-static surface waves in multiple ferrite layer structure [J]. *Electron. Lett.*, 1980, 16: 590—594.
- [5] LIU Ying-Li, ZHANG Huai-Wu. Study on dispersion of magneto-static surface wave wide modes propagating in Multilayer Samples with narrow width [J]. *Journal of Electron*, (刘颖力,张怀武. 多层控制窄样品中静磁表面波宽度模式的射散特性研究. *电子学报*), 2000, 28(7): 28—33.
- [6] LIU Ying-Li, ZHANG Huai-Wu. Study on dispersions of width mode of magneto-static surface wave propagating in periodic multilayer films [J]. *Acta Physica Sinica*, (刘颖力,张怀武. 多层周期薄膜中静磁表面波宽度模式色散特性研究. *物理学报*), 1999, 48(S): 98—102.
- [7] LIU Ying-Li, WANG Hao-Cai, ZHANG Huai-Wu. Study on anisotropy of magneto-static surface wave propagation [J]. *PiezoElectrics & AcoustoOptics*, (刘颖力,王豪材,张怀武. 静磁表面波传输各向异性研究. *压电与声光*), 1999, 21(4): 253—258.
- [8] Ando Y, Guan N, Yashiro K, et al. Excitation of magneto-static surface waves by coplanar waveguide transducers [J]. *Proc. 1995 Asia Pacific Microwave Conf.*, 1997, 1: 17—20.
- [9] Ganguly A K, Webb D C. Micro-strip excitation of magneto-static surface wave; theory and experiment [J]. *IEEE Trans MTT*, 1975, 23: 988—993.
- [10] Ganguly K, Webb D C, Banks C. Complex radiation impedance of microstrip-excited magneto static surface waves [J]. *IEEE Trans MTT*, 1978, 27: 444—453.
- [11] ZHANG Huai-Wu, LIU Yin-Li, WANG Hao-Cai. Materials of magneto-static & information and its application [J]. *Journal of Electron & Technology Guidance* (张怀武,刘颖力,王豪材. 静磁信息材料及应用. *电子科技导报*), 1999, 4(4): 23—28.