



静磁波器件的现状和发展*

陈戈林 马欣 刘用胜 张克潜

(清华大学无线电电子学系)

1988年1月25日收到

在磁偏置 YIG 薄膜中可以传播一种与电子自旋紧密相关的静磁波 (MSW)。它具有可直接工作于常用微波波段、可以电调谐、频带宽等优点,可以满足通信、电子对抗等信号处理系统提出的新要求。本文综述了这种新器件的工作原理、主要形式、系统应用、发展历史、现状及前景展望。

一、引言

微波通讯、雷达系统及其它技术的发展,特别是高速单次过程的分析,要求系统具有高灵敏度、大带宽及实时处理等功能,从而对信号处理器件提出更高的要求。

20年前开始发展起来的 SAW 技术在相当大程度上满足了这方面的要求,但大多数 SAW 器件工作频率低于 1GHz,而卫星通讯、雷达系统通常工作于 S、C 及 X 等波段,SAW 器件难于直接应用。

早在 1956 年, L. R. Walker 提出了静磁波模的概念; 1960 年, J. R. Eshbach 和 R. W. Damon 较详细地研究了铁磁体中的静磁波模,但是由于当时铁磁材料的损耗过高及不均匀性,无法做出实用的静磁波器件。

到了 70 年代后期,利用液相外延制作出了高质量 YIG 薄膜,为静磁波器件的发展打下了基础。

以后,美国、英国、法国、日本等国的一些大学和公司做了大量的研究工作,现已做出半商品产品。近来由于电子技术的发展促进了静磁波-光波作用的研究,使静磁波和集成光电子学紧密结合起来。国内近年来也有一些学校和研究所开展了这方面的研究工作,取得了不少成果。

二、静磁波模^[1-4]

1. 铁磁材料中的自旋波和静磁波

YIG 晶体等铁磁材料的分子都具有净磁矩,这种磁矩主要来源于电子的自旋。当有外加恒磁场 H 时,电子自旋磁矩将绕 H 沿右旋进动,电子磁矩进动方程为

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{M}$ 是自旋磁矩; $\gamma = 2.8\text{MHz/Oe}$, 为旋磁比。由上式可以得到 $\mathbf{M}$ 进动圆频率为 $\omega = \gamma H$ 。

由于阻尼作用,只有当垂直于直流磁场 H 加上微波磁场 h , 且其频率与进动频率一致时,电子可以不断地从微波场中吸收能量维持进动。

在铁磁物质内相邻近的电子自旋状态会因相互作用而产生耦合。所以,当某处电子进动状态被扰动时,扰动可以沿铁磁物质传播,其波动频率与扰动磁场频率一致。这就是自旋波。若自旋波的波长较长,与样品的特征尺寸可以相比拟,但又大大小于电磁波波长时,则样品内电磁之间的耦合很小,而自旋磁矩与微波磁场之间的耦合起主要作用。在这种条件下的自旋波称为静磁波。

在上述条件下,可采用静磁近似。此时,静磁波基本方程为

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma (\mathbf{M} \times \mathbf{H}) \end{cases} \quad (2)$$

* 本工作由国家自然科学基金资助。

表 1 MSW、SAW、EMW 特性比较

波 型	MSW	SAW	EMW
传播介质	YIG	LiNbO ₃	同轴电缆
传播速度	10—1000 km/s	2—6 km/s	200000 km/s
波 长	30 μm(10 GHz)	3 μm(1 GHz)	2 cm(10 GHz)
换能器尺寸	10 μm(10 GHz)	1 μm(1 GHz)	—
衰减系数	1 dB/μs(1 GHz)	1 dB/μs(1 GHz)	100 dB/μs(1 GHz)
	12 dB/μs(10 GHz)	100 dB/μs(10 GHz)	(RG-58 电缆)

静磁波、声表面波、普通电介质中的电磁波各自满足不同的方程,具有不同的性质,现比较如表 1。

由表可见,静磁波波速比声表面波速高 $10-10^3$ 倍,因而在常用微波波段静磁波器件的尺寸较大,工艺易实现。此外,频率高于 10GHz 后,MSW 的传播损耗远远小于 SAW 和 EMW。

2. 铁磁材料的特性

静磁波的传播媒介是铁磁材料(如 YIG),其主要特性如下。

铁磁物质的旋磁性使得磁导率为一种张量

形式,其具体表达式为

$$[\mu] = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & 0 \\ \mu_{21} & \mu_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中

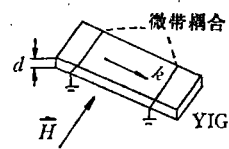
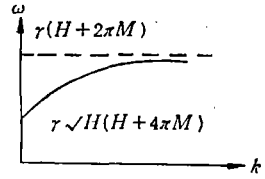
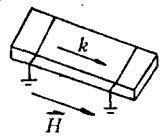
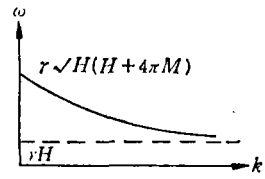
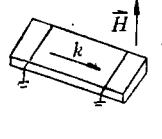
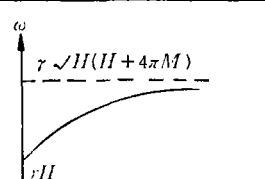
$$\mu_{11} = \mu_{22} = 1 + \frac{Q_H}{Q_H^2 - Q^2},$$

$$\mu_{12} = -\mu_{21} = j \frac{Q}{Q_H^2 - Q^2}.$$

$$Q_H = \frac{\gamma H}{\gamma 4\pi M_s}, \quad Q = \frac{\omega}{\gamma 4\pi M_s}, \quad (\text{高斯制})$$

若考虑阻尼作用,则磁导率中 μ_{11} 、 μ_{12} 、 μ_{21} 、 μ_{22} 为复数^[1]。

表 2 MSW 三种波型的激励方式和色散特性

偏置磁场取向	色散方程	色散示意图
 微带耦合 YIG	静磁表面波 $\exp(2kd) = \frac{(2\pi M)^2}{(H + 2\pi M)^2 - (\frac{\omega}{\gamma})^2}$	
	静磁反向体波 $2\cot(\alpha kd) = \alpha - \alpha^{-1}$ $\alpha = \frac{(\frac{\omega}{\gamma})^2 - (H)^2}{H(H + 4\pi M) - (\frac{\omega}{\gamma})^2}$	
	静磁正向体波 $2\cot(\alpha kd) = \alpha - \alpha^{-1}$ $\alpha = \frac{H(H + 4\pi M) - (\frac{\omega}{\gamma})^2}{(\frac{\omega}{\gamma})^2 - H^2}$	

目前利用 LPE 可以得到 YIG 薄膜的厚度为 $1\mu\text{m}\sim 200\mu\text{m}$, 铁磁共振线宽 ΔH 优于 0.3Oe , YIG 材料的饱和磁化强度为 $4\pi M_s = 1760\text{Oe}$, 掺杂 YIG 的 $4\pi M_s$ 值为 $100\sim 1760\text{Oe}$.

3. 三种静磁波型的激励条件和色散特性^[5-6]

因外加偏置磁场相对于 MSW 传播方向的取向不同, 可存在三种静磁波: 静磁表面波 (MSSW)、静磁前向体波 (MSFVW)、静磁反向体波 (MSBVW). 表 2 示出了三种波的激励方式、色散方程和色散图.

静磁波常用的换能器结构为单条换能器、叉指换能器、多条换能器和曲折线换能器等几种, 其中单条换能器带宽最大^[7].

三、主要的静磁波器件

静磁波器件的主要优点是: (1) 工作频率高, 可直接工作于常用的微波频率 $0.5\sim 30\text{GHz}$; (2) 高频损耗低; (3) 换能器结构尺寸适中, 工艺上易实现; (4) 可以方便地实现宽带电调谐. 下面仅介绍几种常用的静磁波器件.

1. 延迟线

Bongianni^[6] 首先报道了静磁表面波延迟线的理论和实验结果, 以后又有许多学者致力于改善色散特性, 做出了一些线性色散延迟线和非色散延迟线. 如 Adam 等人^[8]用 MSFVW 实现的中心频率 8GHz 、带宽 400MHz 的非色散延迟线和中心频率 10GHz 、带宽为 1GHz 、时间带宽积 230、插损 30dB 的色散延迟线. Glass 等人^[9]提出用多层 YIG 材料控制色散, 在 S 波段 200MHz 带宽内实现 1% 延时平坦度. Morgenthaler^[10] 的结果表明非均匀偏置磁场也可以较精确地控制色散. 还有人把 YIG 片直接置于普通波导中, 也可实现微波信号延迟, 而且通过移动在波导中的位置可以实现参数调整^[11].

2. 滤波器

静磁波滤波器也是一类重要的 MSW 器

件, 它的频率响应可以通过设计适宜的换能器实现. MSW 滤波器工作频率高, 还可以电调谐, 因而一个 MSW 滤波器可以代替多个普通滤波器, 大大简化整机系统, 适应现代通讯技术的需要. 它还可做成宽带器件, 例如在中心频率 4GHz 可以得到 400MHz 带宽, 插入损耗仅 7dB . 目前正在研究换能器加权技术以优化 MSW 滤波器.

3. MSW 谐振器

MSW 谐振器利用做在 YIG 膜上的一对反射栅阵产生驻波, 形成平面谐振腔. 谐振器是一种窄带滤波器, 一般用于谐振器式振荡器, 利用其高 Q 值可获得稳定的低噪声振荡源, 作为固定频率或窄带调频的信号. H-P 公司报道了一种新型谐振器^[12]以降低插损, 提高加载 Q 值, 简化了结构制作的步骤, 称为直边反射谐振器.

4. 信噪比增强器

信噪比增强器的原理是: 它利用 MSW 阈值功率较小这一特点, 则小信号 (小于阈值功率) 的衰减分贝数大, 大信号 (比阈值功率大得多) 的衰减分贝数小, 因而可以改善信号的信噪比. 已研制出器件^[13]在 $2.7\sim 3.7\text{GHz}$ 频带内, 信噪比可提高 20dB .

四、静磁波器件的应用研究

静磁波器件可应用范围较宽, 见表 3. 并列出二例.

表 3 MSW 器件的主要应用

器 件	系 统 应 用
谐振器	窄带滤波器、振荡器
带通滤波器	EMC, 雷达, 信道接收机
色散延迟线	脉冲压缩系统
可调非色散延迟线	相控阵雷达, MTI 雷达, 宽带扫频仪 (可达 3 个倍频程)
抽头延迟线	傅立叶变换, 编码器
磁光偏转、模式转换	频谱分析仪, 光开关, 光隔离器

图 1 是一种实用型的 MSW 器件, 它结构可靠, 尺寸小, 并带有电磁线圈可供电调谐.

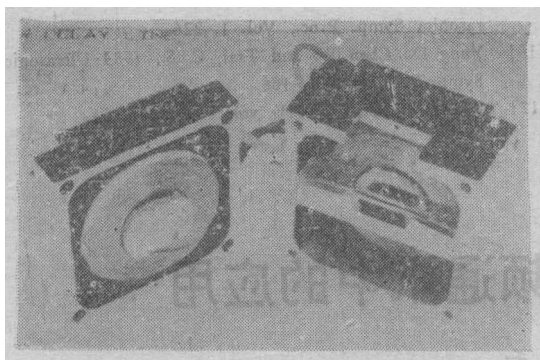


图 1 实用型静磁波延迟线

1. 静磁波振荡器

静磁波振荡器有两种, 延迟线式和谐振器式。振荡频率可以通过改变磁场达到线性调节。MSW 振荡器的特点在于它工作频率高、结构简单、可靠且可以电调谐。如美国 H-P 公司的谐振器式振荡器^[4], 最高频率达到 30GHz。

2. 静磁波与导行光波互作用器件

静磁波与导行光波相互作用时, 由于 Faraday 及 Mouton-cotten 效应的作用, 引起 YIG 中光学折射率发生周期性变化, 引起导行光波的衍射和模式转换。Fisher 等人^[5]获得了衍射效率 4%, 调制动态范围约 30dB 的结果。Yong 等^[6]在 4GHz 时获得了模式转换效率 2.5%。Xey 等^[7]在非均匀磁场中, 获得了约 350MHz 的布拉格衍射带宽。图 2 为静磁波-光波互作用示意图。

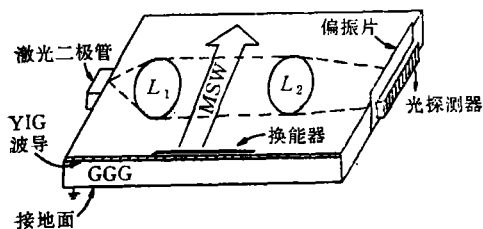


图 2 静磁波-光波互作用

五、现状和展望

到目前为止, SAW 技术经过了近二十年的发展, 在各方面取得了广泛的应用。而 MSW 器件仅经过近十年的发展, 已取得相当大的进展, 多种器件的原型早已研制成功, 可望在近二

年内推出正式产品。MSW 器件可用于讯号处理、微波仪器及光电子技术方面, 具有独特的优越性。

当然, MSW 技术的研究还是不充分的, 目前工作集中于以下几个方面。

1. 提高工作频率。这要求研制出新的材料, 具有更低的 ΔH , 以及改进换能器结构, 降低电路损耗。

2. 进一步增宽器件的频带。如利用宽带换能器阵列、调节偏置磁场分布等。

3. 研制具有更复杂功能的讯号处理器件, 具有更高的时间带宽积。

4. 研制实用的磁光作用器件。如频谱分析、快速光开关、光隔离器和环形器等。

5. 还要进行若干基础性研究工作, 改善材料性能、增宽 M_c 范围、提高温度稳定性等。还要进一步完善换能器理论, 并在此基础上实现 CAD。

总而言之, 经过十年的努力, MSW 器件原理方面的问题已基本得到解决, 下面的问题是如何改进材料及电路结构以使它实用化, 并在各方面得到广泛应用和不断发展。我们有理由相信, 就象 SAW 技术一样, MSW 技术的第二个十年将会取得更加辉煌的成果。

参 考 文 献

- [1] 北京大学物理系, 铁磁学, 科学出版社, 1976.
- [2] Walker L. R., *Phys. Rev.*, **105**(1957), 390—399.
- [3] Damon R. W. and Eshbach J. R., *J. Phys. Chem. Solids*, **19**(1961), 308—320.
- [4] Glass H. L. and Elliott M. T., 10th. Int. Conf. Crystallography (Amsterdam), 08, 1975, 3—8.
- [5] Weinberg I. J., IEEE 1980 Ultrasonics Symp., 557.
- [6] Bongianini W. L., *J. Appl. Phys.*, **43**(1972), 2541—2548.
- [7] Gunguly A. K. and Webb D. C., *IEEE Trans. MTT*, **23**(1975), 998—1006.
- [8] Adam J. D., O'Keefe T. W. and Daniel M. R., Proc., 1980 SPIE Conf., Vol. III, 241.
- [9] Glass H. L. and Atkins L. R., IEEE 1980 Ultrasonics Symp., 4.
- [10] Morgenthaler F. R., 1980 Ultrasonics Symp. Proc., 532.
- [11] Radmanesh M., Chu C. M. and Haddad G. L., *Micro-wave Journal*, **29-7** (1986), 135—140.
- [12] Huijter E. and Ishak W. S., *IEEE Trans. Magn. Mag-* **20**(1984), 1232—1234.

- [13] Adam J. D. and Stitzer S. N., *Appl. Phys. Lett.*, 36 (1980), 485—486.
 [14] Ishak W. S., Keese E., Baer R. and Fowler M., *IEEE Trans. Magn.*, Mag-20(1984), 1229—1231.
 [15] Fisher A. D., Gaynor E. S. and Lee J. N., 1983 Ultrasonics Symp. Proc., Vol. 1, 226.

- [16] Yung D., Chen W. and Tsai, C. S., 1984 Ultrasonics Symp. Proc., Vol. 1, 168.
 [17] Wey C. T., et al., SPIE, vol. 704, 1986, 51.

SAW 卷积器在扩频通讯中的应用

索 召 和

(航 天 部 25 所)

1987 年 12 月 30 日收到

本文介绍了 SAW 卷积器在扩频通讯中实现快捕的原理及一些实现方法,并对目前 SAW 弹性卷积器的性能、水平及国内外应用情况作了概述。

一、引 言

在通讯技术中,保密问题越来越受到人们的重视。为防止被窃听和干扰,要求系统有较好的保密和抗干扰能力。目前,扩频系统即为应用较为广泛的系统之一。

扩频通讯中有一个关键技术,就是如何实现快速同步的问题。实现的方案大致分为两类,一为匹配滤波器法,一为有源相关器法。近年来,随着 SAW 卷积器和抽头延迟线等器件的发展,第一类方案变得越来越简单、实用。用 SAW 卷积器作为可程序匹配滤波器,不但获得了大带宽(达 100MHz)、大时带积(>1000)、可编程等优良性能,而且体积大大减小,因而在扩展频谱通讯中获得了越来越广泛的应用。

二、SAW 弹性卷积器

SAW 卷积器是用声表面波技术实现的高性能信号处理器件,作为可程序匹配滤波器,它在自己的时间和带宽范围内具有完整的波形适应性。自 70 年代初 SAW 卷积器问世以来,各种各样的 SAW 卷积器相继出现,如气隙式、半导体卷积器等^[1-2],但由于它们的工艺均

较复杂或性能欠佳,因而其应用受到一定限制。近几年来,改进的 LiNbO₃ 单片 SAW 弹性卷积器的出现,使其应用进入了一个新阶段。其原理如图 1。图 1 中,两输入信号进入卷积器后相向传播,在积分区间叠加后,由于压电器件的非线性相互作用,会输出积分^[3]

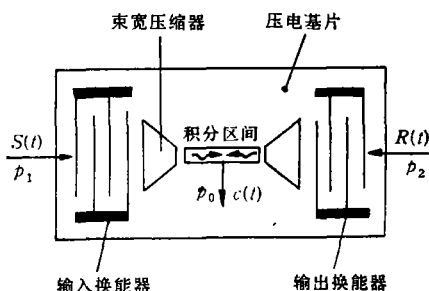


图 1 SAW 弹性卷积器原理图

$$c(t) = K \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} S(\tau) \cdot R(2t - \tau) d\tau$$

(时间压缩)

如果 $R(t)$ 为 $S(t)$ 的时间反转,则输出为

$$c(t) = K \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} S(\tau) \cdot S(\tau - 2t) d\tau = r(t)$$

此即为 $S(t)$ 信号时间压缩的自相关。实际中, $S(t)$ 即为接收信号,而 $R(t)$ 为本地参考信号。例如, $S(t)$ 为 m 序列扩频码,则 $R(t)$ 应为其逆码。

SAW 卷积器的性能主要由以下几个指标来衡量 a. 卷积效率 $F_1 = 10 \lg (P_0/P_1 \cdot P_2)$,