

# 微波磁学及其应用的新进展

王会宗

(北京无线电测量研究所)

美国、苏联等国家对毫米波技术,隐形技术等研究非常重视,并认为是发展通讯和先进武器系统的重要手段,本文对这些技术和先进武器所需要的微波铁氧体材料及器件进行讨论。根据国际上的发展动态,指出我国要努力加强对毫米波铁氧体材料和器件,微波吸收材料,静磁波材料和器件,移相器和双模器件等技术的研究。

自从50年代初微波铁氧体问世以来,世界先进资本主义国家十分重视这方面研究,至今各类微波铁氧体材料和器件都有很大的发展,并且比较稳定地递增。

我国60年代初开始研制微波铁氧体材料和器件,目前厘米波铁氧体器件品种、规格基本上能满足雷达、电子对抗、微波通讯、遥感、人造卫星等方面的需要。但宽带器件、双模器件等与国外有一定差距。

由于隐身技术和毫米波技术的发展,现代战争出现多批次机群轰炸和电子对抗,需要有对付多目标的相控阵雷达和提高雷达识别能力。因此,人们非常重视毫米波铁氧体材料及器件、微波吸收材料、铁氧体移相器和双模器件等方面研究。本文对上述几个重要发展方向加以扼要讨论。

## 一、毫米波铁氧体材料

毫米波技术已成为80年代人们所关心的技术,美国、苏联等国家都开展了毫米波技术研究,把毫米波的研究看成是发展通讯和先进武器系统的重要手段。在常用的镍系和锂系铁氧体中,用Zn, Co等氧化物置换量多少来调整饱和磁化强度( $4\pi M_s$ )的大小,在毫米波频率范围内,尽可能提高 $4\pi M_s$ ,但也不能无限制地提高。用这二个系列材料制成器件,其插损比较小。例如,40GHz频率范围的结型波导环

行器、隔离器,采用NiZn铁氧体时,其 $4\pi M_s$ 为5000Gs,插损小于0.1dB。在96GHz频率范围,采用NiZn铁氧体时,其 $4\pi M_s$ 为5250Gs,插损小于0.5dB。频率分别为35GHz和55GHz的NiZn铁氧体开关,其插损分别小于0.25dB和0.7dB, $4\pi M_s$ 为5000Gs。

随着频率的增加,工作在铁磁共振点或附近的铁氧体器件,要求外加恒磁场很高。因此,人们常选用高内场的磁铅石型铁氧体材料。这种材料只有M型和W型二种有使用价值。我们主要利用其单轴(C轴)磁各向异性,在工艺上可以采取磨粉,使粉末球磨到单畴的临界尺寸以下,在磁场下成型,通过烧结可使所有C轴都尽可能平行排列,这样的材料磁各向异性场 $H_a$ 可达几万奥斯特。因此,在很高频率下,为了使这种材料共振,仅需很低的外加恒磁场就能使铁氧体磁化到饱和状态。

在M型材料中,当 $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ 在室温时,各向异性场 $H_a$ 达 $1.7 \times 10^4 \text{Oe}$ , $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ 为 $1.9 \times 10^4 \text{Oe}$ 。这样高的磁各向异性场,适用于30GHz频率附近。当使用频率更高时,必须增加 $H_a$ ,一般 $\text{Al}^{3+}$ 置换部分 $\text{Fe}^{3+}$ ,如 $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ 随 $\text{Al}^{3+}$ 的含量增加,由于 $4\pi M_s$ 下降较快,因而 $H_a = |K_1/M_s|$ 反而随Al含量增加而上升。当 $x = 1.9$ 时, $H_a = 3.4 \times 10^4 \text{Oe}$ ,这样的材料可以用于60GHz频率范围。

有人将这系列的铁氧体用于毫米波谐振式隔离器,得到较满意的结果。例如,在33—50

GHz 频率下, 用材料配方  $BaAl_xFe_{12-x}O_{19}$ , 当  $x = 0-1$  时, 其  $H_a = (12.6 \sim 19) \times 10^3 Oe$ ; 在 50—110GHz 频率下, 用材料配方  $SrAl_xFe_{12-x}O_{19}$ , 当  $x = 0$  时,  $H_a = 19 \times 10^3 Oe$ ,  $x = 1.25$  时,  $H_a = 4.0 \times 10^4 Oe$ . 一般认为在 500 GHz 以内采用磁铅石型铁氧体材料, 在 500 GHz 以上用反铁磁材料, 但也有人 500GHz 以内用反铁磁材料。

由于毫米波器件频率高, 铁氧体块尺寸也很小, 为了提高器件性能, 常采用块状和薄膜状的单晶材料。例如, 在  $MgO$  和  $Zn(Ga, Al)_2O_4$  基片上外延可生长铈铁氧体薄膜<sup>[4]</sup>, 最低的线宽为 7.8 Oe (9.07GHz)<sup>[2]</sup>, 达到了实用要求; 在  $Mg(In, Ga)_2O_4$  基片上生长的 W 型六角晶系铁氧体薄膜, 最窄线宽为 42Oe。

## 二、毫米波铁氧体器件

随着毫米波技术的发展, 不断要求采用象厘米波段一样的各种铁氧体器件。国外从 60 年代开始就报道了 70GHz 和 140GHz 波导结型环行器的研制情况。1988 年, 美国电磁科学公司 (Electromagnetic Sciences Inc.) 列出了三种毫米波铁氧体器件的部分性能 (见表 1 和图 1), 但没有报道器件隔离和带宽, 总的来说插损和开关时间比较小。铁氧体移相器也有很大的发展。据报道用  $4\pi M_s$  为 3000Gs, 直径为 1.57 mm 的镁锰铁氧体圆杆制成的双模互易式移相器, 可工作在 60—63GHz 频率范围, 其插损小于 1.5dB, 转换时间为 12 $\mu s$ 。在毫米波段, 磁环式的插损要大些, 通常用等离子体技术喷涂, 在

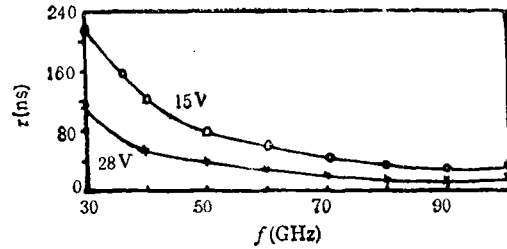


图 1 不同工作电压下开关时间  $\tau$  与频率  $f$  的关系

介质上形成磁环。Babbitt 等人<sup>[4]</sup>用  $LiZn$  铁氧体 ( $4\pi M_s = 4100Gs$ ) 喷涂在介质上的方法, 研制成 35GHz, 65GHz, 94GHz 移相器, 其中 35GHz 优值为 360°/dB, 随后有人做到优值达 649°/dB, 带宽为 0.6GHz。

我国北京无线电测量研究所、西南应用磁学研究所等单位研制的八毫米波段环行器、隔离器、开关等器件已达到实用要求, 其开关插损小于 0.5dB, 隔离大于 23dB, 驻波系数小于 1.2, 带宽为 7%, 开关时间小于 1 $\mu s$ 。南京金陵无线器材厂研制的八毫米波段隔离器, 带宽为 1GHz, 插损为 0.1dB, 隔离为 35dB, 驻波系数为 1.1。西南应用磁学研究研制的环行器, 工作在 70GHz 频率时, 插损小于 1.0dB, 驻波系数小于 1.3, 带宽为 4GHz。

为了适用于毫米波段混合集成电路, 70 年代中期发展起来一种鳍线。它是一种新型传输线, 具有单模工作、频带宽、损耗小、 $Q$  值高、便于和半导体器件结合使用等特点, 可用于 30—100GHz 的集成电路中。国外已研制出各种鳍线隔离器和环行器, 如在 31GHz 频率时, 鳍线谐振式隔离器插损为 1.3dB, 隔离为 21dB。成都电子科技大学研制出八毫米波段鳍线铁氧体

表 1 典型的几种毫米波器件部分性能<sup>[5]</sup>

频率 (GHz)	环行器、隔离器 插损 (dB)	开 关		频率 (GHz)	可调功率移相器		移 相 器	
		插损 (dB)	开关能量 ( $\mu J$ )		插损 (dB)	驱动能量 ( $\mu J$ )	插损 (dB)	驱动能量 ( $\mu J$ )
20	0.08	0.10	50	20	0.40	80	0.70	100
30	0.10	0.12	20	30	0.50	50	0.90	70
44	0.12	0.15	20	44	0.75	30	1.20	50
60	0.17	0.20	15	60	1.25	25	1.60	40
94	0.20	0.40	10	94	1.50	/	/	/

场移式隔离器,带宽达 3GHz,插损  $\leq 2\text{dB}$ ,隔离  $>25\text{dB}$ ,驻波系数  $<1.4$ .

同样为了适用于毫米波高端频率的传输,人们正在研制介质波导和镜象波导,同时也探索了与此相适应的铁氧体器件.美国从理论上论证了镜象波导耦合波器件,预期 200GHz 时,用  $4\pi M_s$  为 5000Gs 的铁氧体,可以制成隔离器和环行器,其插损为 1dB,隔离为 10dB,带宽为 10GHz.

### 三、微波吸收材料

60 年代初期,美国已注意到对隐形技术,尤其是对隐形飞机和巡航导弹的研究.美国空军投入 73 亿美元,研制一种 ATB 隐形轰炸机,将于 1991 年批量装备部队.美国国防部认为隐形飞机的研制成功是有效地改变军事力量对比的重大技术进步,是 80 年代电子对抗技术的一项重大突破.

微波吸收材料是由磁性材料或加磁性材料组成的各种复合材料,它是隐形技术的关键材料.常用铁氧体作为微波吸收材料的有锂锌铁氧体、锂镉铁氧体、镍镉铁氧体、镍锌铁氧体、锰锌铁氧体、镁锌铁氧体及陶瓷铁氧体等,其中陶瓷铁氧体为较佳涂料,其涂层薄、重量轻、性能

稳定.在铝板上涂 0.08mm 厚的陶瓷铁氧体,可吸收 10GHz 雷达电磁波能量的 68%.日本东京电气化学工业公司研制成功一种吸收材料,它是由铁氧体粉、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  粉同氯丁橡胶、氯磺化聚乙烯橡胶等高分子材料混合而成,吸收厚度 1.7—2.5mm,对 5—10GHz 的电磁波吸收衰减达 30dB 以上.日本还研制成功一种陶瓷磁性材料,对电磁波吸收率达 99.2%,可在高温下保持高频磁性,机械强度和导热系数都很高,能耐强光照射,使用频率可以从 10MHz 到  $10^4\text{MHz}$ .它不仅可用于飞机、导弹、侦察卫星等军事方面,而且可以用于宇航技术.

### 四、静磁波材料和器件

静磁波是在微波频率下,在偏置磁化的铁氧体材料中传播的磁控静磁波,它是一种慢波,也是一种频散波.它在不同偏磁情况下能以静磁表面波、静磁正向体波或静磁反向体波三种模式传播,其中以静磁表面波的换能器耦合效率最高.静磁表面波在铁氧体中的传播是各向异性的,波的能量根据传播方向的不同而被限制在铁氧体的某一表面,在材料的内部能量分布是按指数衰减的.

为了得到很好性能的静磁波器件,必须要

表 2\* 部分静磁波器件的性能和应用<sup>[1]</sup>

器件名称	性能	应用范围
线性色散延迟线	$B_w = 1\text{GHz}$ , $f_c = 9\text{GHz}$ $I_1 = 30\text{dB}$ , $TB = 200$ 线性偏离 $\pm 5\text{ns}$	脉冲压缩雷达、傅里叶变换、压缩式接收机、速度传感器
可编程抽头延迟线	$f_c = 9\text{GHz}$ , $I_1 = 20\text{dB}$ (在任一抽头上)可产生四位巴克(Barker)码,并使之相关	匹配滤波器、信号转移、电子干扰、均衡器、组合延迟线
振荡器	$f_c = 9\text{GHz}$ , $Q = 500$ , $0\sim 60^\circ\text{C}$ , 频漂 1MHz	稳定信号源
信噪比增强器	$f_c = 4\text{GHz}$ , $B_w = 800\text{MHz}$ 在 15dB 输入时,有 10dB 的增强, $I_1 = 10\text{dB}$	在新型的接收机技术以及频率存储回路中的应用
10 信道滤波器组	X 波段, $I_1 = 12\text{dB}$ , 一个输入,十个输出,在 30dB 电平下, $B_w = 100\text{MHz}$	电子对抗技术、雷达、通讯卫星转发器
脉冲压缩器	$B_w = 400\text{MHz}$ , $f_c = 3\text{GHz}$ $I_1 = 10\text{dB}$ , 压缩比 = 44	脉冲压缩雷达

\*  $B_w$  为带宽,  $f_c$  为中心频率,  $I_1$  为插损,  $TB$  为时间带宽乘积.

表3 双模移相器的性能

性能	3cm 波段	10cm 波段	10cm 波段	2cm 波段
中心频率 (GHz)	9.1	3.2	3.2	35.0
带宽 (%)	10	3	3	6
峰值功率 (kW)	1.0	150	8	0.5
平均功率 (kW)	0.1	1.6	1.5	0.005
插入损耗 (dB)	0.6±0.2	0.9±0.1	1.1±0.2	2±0.2
相移 (°)	0-650(模拟) 0-500(锁式)	0-200(模拟)	0-1050(模拟)	0-800(模拟) 0-360(锁式)
开关时间 (μs)	2-70(锁式)	中等	中等	2(锁式)
冷却方式	空气	液体 ±2°F	液体 ±2°F	空气
材料	铁氧体	掺杂石榴石	掺杂石榴石	NiZn 铁氧体

有好的材料,它包括基片和液相外延薄膜。基片一般用  $Gd_3Ga_5O_{12}$  (简称 GGG) 单晶,要求表面位错密度小于  $5/cm^2$ 。此外,外延膜与基片之间的晶格常数要匹配,为此常在 YIG 膜中掺入适量 La 离子,外延成 La:YIG 单晶薄膜。La 离子既可以调节晶格常数,又可以调节薄膜的生长感生各向异性。

为了使器件能在 1GHz 频率附近工作和改善频散特性,常掺入 Ga 离子以降低薄膜的  $4\pi M_s$ 。要使器件在毫米波段工作,相应地要提高单晶薄膜的  $4\pi M_s$  ( $>1750Gs$ )。人们研制出在尖晶石基片上外延生长钽铁氧体单晶薄膜,或在六角晶系基片上外延生长钽铁氧体薄膜。

近几年国外已研制出具有一定性能的器件(表2)。我国华中理工大学在 1986 年研制成功静磁表面波延迟线,工作频率在 4000 MHz 时,带宽为 50MHz,延迟时间为 50ns,插损小于 17dB,承受峰值功率可达 5W。西南应用磁学研究所研制成功的静磁波延迟线,在工作频率为 4.3GHz 时,带宽为 0.2 GHz,延迟时间为 135ns,插损小于 20dB。多层复合单晶薄膜结构对改善静磁波器件的频散特性是很有成效的。多层膜中各磁性层既可以是 La:YIG,也可以是 (La, Ga):YIG,而两层磁性层之间的介质夹层选用 GGG 外延单晶薄膜。

静磁波器件最大特点是能在微波频率下直接作模拟信号处理,它与其它器件相比具有许

多优越特性。虽然声表面波器件有很好的信号处理能力,但在微波频率下损耗太大,换能器的制造也十分困难。电磁延迟线损耗大,外形笨重。总之,静磁波器件随着材料研究深入,它将有很大的发展前途。

## 五、移相器和双模器件

移相器是相控阵雷达的关键器件,移相器分 PIN 晶体管和铁氧体二种,一般 5cm 波段以上用铁氧体移相器较多,因为铁氧体移相器具有高频特性好,插损小,承受功率高等优点。

由于相控阵雷达要求移相器数量很多,因此,要求移相器一致性好,小型化,可靠性高,温度稳定性好,价格便宜等。解决温度稳定性问题,除改进材料的温度特性外,驱动器采用磁通反馈技术,可以使问题得到满意的解决。

10cm, 5cm, 2cm 波段的非互易移相器在美国均有产品出售,他们可以生产 4.3—35GHz 频率范围数字锁式移相器。我国北京无线电测量研究所在 10cm, 5cm, 3cm 波段都研制和生产了几代产品,其中 3cm 波段移相器为五位,插损为 0.7dB,在 10% 带宽内驻波系数小于 1.3,相移精度最大为  $10^\circ$ ,工作温度为  $-40\sim+60^\circ C$ ,重量为 38g。

随着空间技术的发展,为探测识别卫星、导弹等在空间运动姿态,需要发射水平极化、垂

直极化或正负圆极化等多种极化的电磁波。另外,为了提高雷达抗干扰能力,也需要发射和接收多种极化的电磁波,以消除或减弱雨点、云雾或者其它干扰波的干扰。这样就需要研制极化不灵敏移相器。

双模互易移相器在美国已有商品出售,表3列出他们研制的性能指标。10cm波段时其承受平均功率为1.6kW,插损为1dB,带宽为3%。旋转场移相器有较高的相移精度,同时能承受较高的平均功率。美国电磁科学公司生产的旋转场移相器,5cm波段时其承受平均功率达几百瓦,在360°范围内精度可达 $\pm 1^\circ$ ,这对于高功率下需要相位调整的系统是非常有用的。

我国双模铁氧体器件也做了一定工作,南

京电子技术研究所在5cm波段和3cm波段均做出器件,北京无线电测量研究所在10cm波段做出了极化不灵敏移相器,带宽为12%,360°相移的插损为1.3dB,变极化器的带宽接近10%,由线极化到圆极化的插损为0.5dB,椭圆度小于1.0dB。

- [1] G. O. White et al., *J. Mag. Mat.*, **9**(1978),299.
- [2] H. L. Glass et al., *Mat. Res. Bull.*, **13** (1978), 353.
- [3] E. Sciences, *Microwave J.*, **31-6**(1988), 27.
- [4] R. W. Babbitt, *IEEE Trans. Mag.*, **MAG-15** (1979), 1744.
- [5] F. R. Morgenthaler, *J. Appl. Phys.*, **53** (1982), 2652.
- [6] J. D. Montgomery, *Microwave J.*, **26-3**(1983),40

## 布居反转对于激光作用是必不可少的吗?

现有的每一本与激光有关的物理学教科书都是这样写的:布居反转是激光作用的必要条件。美国斯坦福大学的S. E. Harris发现了这一条公理有一个例外,他写了一篇文章“*Lasers without Inversion: Interference of Lifetime-Broadened Resonances*”,发表在“*Phys. Rev. Lett.*”第62卷第9期(1989年2月27日)第1033—1036页上。在“*Lasers & Optronics*”第8卷第5期(1989年5月)第18页上介绍了Harris的文章和观点。Harris发现的这个例外的基础是由理论物理学家U. Fano在1961年首先解释的一种干涉效应,称为Fano干涉。此效应是在存在几个量子力学路径到达同一连续谱能级末态的情况下发生的一种干涉效应。

在一个四能级激光系统中,如果它的两个上能级是纯寿命加宽的,并且衰减到同一个连续谱能级(衰减可能来自于俄歇过程或自电离等过程,寿命极短),那么当原子从下能级被激发到两个上能级时(可通过电子激发或光泵激发等),在处于较高下能级的原子的吸收谱中发生Fano干涉,而在上能级原子的发射谱中没有

这种干涉。于是在适当的条件下,对于某些波长的吸收截面能够减少到零,这时即便下能级布居大于上能级布居,也会有净增益,可能发生激光作用。

发生激光作用的决定性判据实际上是:对于激光跃迁的增益必须大于吸收,也就是必须有净增益。因为增益和吸收在一般情况下都正比于上能级和下能级的布居,所以一般认为这意味着布居反转是必不可少的。但是在发生Fano干涉的情况下,有可能出现例外。

Harris称Fano干涉为“一个著名的实验事实”,但是激光物理学家们以前似乎忽视了它的内在含意,至今还没有人制造出一台无布居反转的激光器。Harris说,他正在探索这种可能性,一是利用量子阱半导体结构中的隧道效应跃迁;二是利用X射线和光谱远紫外部分的高能跃迁(例如,具有同样角动量的里德伯能级之间的干涉可以是Fano干涉)。这种无布居反转激光器的理论意义很明显是十分巨大的,它们是否有实际意义尚在研究之中。

(朱振和根据 *Phys. Rev. Lett.* 1989年  
第62卷第9期第1033—1036页编译)