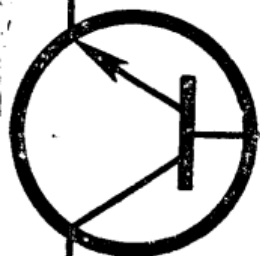


微波铁氧体器件

李天成 杨德顺 王家礼 编



西北电讯工程学院

1975



微波铁氧体器件

李天成 杨德顺 王家礼 编

西北电讯工程学院

1975. 2.

说 明

本教材是我院微波工程专业教材之一，该专业并不是着重于磁性元件各个领域的研究，而是从微波工程中常用器件的角度来研究微波铁氧体器件。因而，由于教学时数的限制，在学习该课程之前，没有系统的学习过铁磁学和铁氧体磁性材料课程。为便于学习起见，在绪论中，我们加入了一部份磁学方面的基本知识。同时，从教学和同学回到三大革命实践中去以及我们下厂中所碰到的问题来看，我们感到，在编写教材的过程中，应考虑到这方面的需要。因而在内容的取舍方面，较多于教学大纲的要求。

在伟大的无产阶级教育革命中，深感教材的编写是教育革命中改革的重要部份。但由于我们路线斗争觉悟不高，在编写过程中一定存在着不少错误和缺点，甚至存在有原则性的错误。希望使用本教材的同志，能提出批评意见。

编 者

主要符号表

<p>\vec{P} 电子自旋动量距</p> <p>γ 机械比或旋磁化</p> <p>\vec{M}_0 磁化强度矢量的直流部分</p> <p>\vec{H} 磁场强度矢量</p> <p>\vec{h} 磁场强度矢量的交流部分的振幅</p> <p>h_x, h_y, h_z 矢量 \vec{h} 在 x, y, z 方向的分量</p> <p>\vec{b} 磁感应强度矢量的交变部分</p> <p>\vec{E} 电场强度矢量</p> <p>χ 磁化系数(或磁化率)</p> <p>μ 张量导磁率(或张量导磁系数)</p> <p>k 张量导磁率的耦合系数</p> <p>μ_- 左圆(或负圆)极化波导磁率</p> <p>ω_{Hez} 铁磁共振角频率</p> <p>ω_r 张弛频率</p> <p>ΔH 共振线宽</p> <p>N 张量去磁系数</p> <p>N_T 横向去磁系数</p> <p>$4\pi M_s$ 饱和磁化强度</p> <p>β 相位常数</p> <p>α_+ 正向衰减</p> <p>F 优质</p> <p>$\Delta\beta$ 差相移</p> <p>λ_{kP} 截止波长</p> <p>K_1/M_s 各向异性常数</p> <p>O_e 外界 Q 值</p>	<p>\vec{I} 电子自旋磁矩</p> <p>\vec{M} 磁化强度矢量</p> <p>\vec{m} 磁化强度矢量的交流部分的振幅</p> <p>m_x, m_y, m_z 矢量 \vec{m} 在 x, y, z 方向的分量</p> <p>\vec{H}_0 磁场强度矢量的直流部分</p> <p>\vec{B} 磁感应强度矢量</p> <p>b_x, b_y, b_z \vec{b} 在 x, y, z 方向的分量</p> <p>\vec{D} 电感应强度矢量</p> <p>χ 磁化率张量</p> <p>μ 张量导磁率的对角线元素</p> <p>μ_+ 右圆(或正圆)极化波导磁率</p> <p>ω 微波源的角频率</p> <p>ω_H 无损耗情况下的铁磁共振角频率</p> <p>ω_m 外加磁场为 $4\pi M_s$ 时的共振角频率</p> <p>ΔH_k 自旋波线宽</p> <p>N_x, N_y, N_z 椭球体的轴与 x, y, z 坐标轴一致时的张量去磁系数在 x, y, z 方向的分量</p> <p>μ_{\perp} 有效导磁率</p> <p>Γ 传播常数</p> <p>α 衰减常数</p> <p>α_- 反向衰减</p> <p>β 相移</p> <p>f_{kP} 截止频率</p> <p>h_{kP} 门限电平磁场</p> <p>Q_u 谐振器无载 Q 值</p>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

目 录

主要符号表

绪 论	1
§ 1 铁磁性能的来源	1
§ 2 磁化曲线和磁滞回线	4
§ 3 铁氧体材料的类型	6
§ 4 铁氧体的制备工艺	8
§ 5 铁氧体在微波领域的应用	9
第一章 铁磁谐振	10
§ 1.1 单个电子的进动	10
§ 1.2 不计损耗时的铁磁谐振	12
§ 1.2-1 铁磁谐振的数学分析	12
§ 1.2-2 张量磁化系数和张量导磁系数	13
§ 1.2-3 在圆极化波作用下的铁磁谐振	15
§ 1.3 有损耗情况下的铁磁谐振	17
§ 1.3-1 表示损耗的两种方法	17
§ 1.3-2 有损耗情况下的导磁系数	18
§ 1.3-3 在圆极化波的作用下, 计入损耗时的导磁系数	21
§ 1.4 去磁效应	22
§ 1.4-1 表面去磁效应	22
§ 1.4-2 体积去磁效应	26
§ 1.5 高功率铁磁谐振	30
§ 1.5-1 自旋波及其频谱特性	31
§ 1.5-2 自旋波的激发及其对谐振线宽的影响	35
§ 1.5-3 高功率铁磁谐振特性	39
一、自旋波频率 $\omega_k = \frac{\omega}{2}$, $\omega \neq \omega_H$ 的情况——低于主谐振峰的附加吸收	40
二、 $2\omega_k = \omega = \omega_H$ 的情况——主谐振峰与附加吸收峰重合的情况	42
三、 $\omega_k = \omega = \omega_H$ 的情况——主谐振峰的不成熟饱和	43
§ 1.5-4 主谐振峰的早期衰落	44
§ 1.5-5 自旋波线宽 ΔH_k 与器件的高功率承载能力	45
§ 1.6 微波铁氧体器件的损耗	46
§ 1.6-1 介电损耗	46
§ 1.6-2 不饱和磁化所引起的零场损耗	47

第二章 电磁波在无限大铁氧体介质中的传播	50
§ 2.1 旋磁介质中的马氏方程及对偶原理.....	50
§ 2.2 平面电磁波在无限大铁氧体介质中的传播.....	51
§ 2.3 纵向磁化旋磁介质中的平面波——法拉第效应.....	52
§ 2.4 横向磁化旋磁介质中的平面波——卡登·冒登效应.....	58
§ 2.5 线性微波铁氧体器件的分类和工作点的选择.....	61
第三章 隔离器	64
§ 3.1 填满横向磁化铁氧体的矩形波导.....	64
§ 3.2 含有横向磁化铁氧体片的矩形波导.....	69
§ 3.2-1 含有横向磁化单片铁氧体的矩形波导.....	69
§ 3.2-2 含有横向磁化单片铁氧体和介质片的矩形波导.....	73
§ 3.2-3 含有双片横向磁化铁氧体的矩形波导.....	74
§ 3.3 场移式矩形波导隔离器.....	76
§ 3.3-1 场移式矩形波导隔离器的理论分析.....	77
§ 3.3-2 场移式隔离器的设计和实验研究.....	81
§ 3.3-3 介质加载的研究.....	87
§ 3.4 谐振式隔离器.....	92
§ 3.4-1 谐振式隔离器的基本原理.....	93
§ 3.4-2 E型谐振式隔离器.....	93
§ 3.5 高功率谐振式隔离器.....	98
§ 3.5-1 高功率谐振式隔离器的结构问题.....	98
§ 3.5-2 H型谐振式隔离器.....	102
§ 3.5-3 谐振式隔离器的宽频带技术.....	110
§ 3.6 其它结构形式之谐振隔离器.....	110
第四章 环行器	116
§ 4.1 环行器的性能指标.....	116
§ 4.2 散射矩阵.....	117
§ 4.2-1 散射矩阵的特性.....	118
§ 4.2-2 散射矩阵的本征值和本征矢.....	120
§ 4.2-3 利用散射矩阵对环行器的一般分析.....	124
§ 4.3 波导型 Y 环行器.....	126
§ 4.3-1 Y 型环行器实现环行的充分必要条件.....	127
§ 4.3-2 H 平面 Y 型波导结构的散射矩阵及其本征和本征矢.....	128
§ 4.3-3 Y 环行器的调整——实验设计问题.....	131
§ 4.3-4 宽频带波导 Y 环行器.....	136
§ 4.4 带状线 Y 环行器.....	139
§ 4.5 X 型波导结四端环行器.....	145
§ 4.6 双 Y 结型四端环流器.....	151

§ 4.7 相移式四端环行器	152
§ 4.7-1 相移式四端环行器的散射矩阵分析	152
§ 4.7-2 输入输出端均为魔 T 的相移式四端环行器	156
§ 4.7-3 输入输出端均为 3db 侧壁定向耦合器的相移式环行器	158
§ 4.7-4 定向耦合器分别为魔 T 及 3db 侧壁耦合器的情况	159
§ 4.7-5 相移式环行器的不完善性分析	159
第五章 法拉第旋转式器件	163
§ 5.1 带有铁氧体杆的圆波导	163
§ 5.2 法拉第旋转式器件	165
§ 5.2-1 法拉第旋转式环行器	165
§ 5.2-2 转门结式环行器	168
§ 5.2-3 法拉第旋转式隔离器	169
§ 5.2-4 法拉第旋转式微波开关	170
§ 5.3 法拉第旋转式器件的频率特性	172
§ 5.4 法拉第旋转式器件的损耗特性	175
§ 5.5 法拉第旋转式器件的设计	179
第六章 相移器	183
引言	183
一、电子扫描天线的原理	183
二、相移器的分类	184
三、对相移器的要求	185
§ 6.1 纵场片状铁氧体相移器——互易型相移器	186
§ 6.2 Reggia-Spencer 相移器	187
§ 6.2-1 基本工作原理	188
§ 6.2-2 实验研究	189
§ 6.2-3 波导模拟闭锁式 Reggia-Spencer 相移器	193
§ 6.3 横场片状相移器——非互易型形式相移器	194
§ 6.4 闭锁式铁氧体数字相移器	199
§ 6.4-1 闭锁式铁氧相移器的理论分析	201
§ 6.4-2 闭锁式铁氧数字式相移器的设计	213
§ 6.5 闭锁式模拟相移器	224
§ 6.6 带状线性闭锁式相移器	225
第七章 极化变换器、双模相移器和铁氧体微波开关	228
§ 7.1 双通道差相移式极化变换器	228
§ 7.2 双模差相移式极化变换器	230
§ 7.2-1 双模差相移段	231
§ 7.2-2 非互易圆极化器	232
§ 7.2-3 双模差相移式极化变换器	233

§ 7.3 双模互易铁氧体相移器·····	234
§ 7.3-1 双通道互易铁氧体相移器·····	234
§ 7.3-2 双模互易铁氧体相移器·····	234
§ 7.4 铁氧体微波开关·····	236
§ 7.4-1 截止式铁氧体开关·····	238
§ 7.4-2 闭锁式环流器转换开关·····	238
第八章 微波单晶铁氧体器件 ·····	240
§ 8.1 微波单晶铁氧体的特性·····	240
§ 8.2 微波单晶铁氧体谐振器谐振频率的温度漂移·····	245
§ 8.3 单晶谐振器的无载Q值和最低调谐频率·····	247
§ 8.4 磁调带通滤波器·····	248
§ 8.5 微波铁氧体非线性效应及应用·····	253

绪 论

铁氧体是铁和其它一种或多种适当的金属元素的具有磁性的复合氧化物，和金属材料比较，它具有较高的电阻率（一般铁氧体的电阻率从 $10^2 \sim 10^8$ 欧姆厘米）。就其导电性而言，它是属于非金属性的，所以又称非金属磁性材料。此特点乃是铁氧体用于微波波段的重要因素。因为在微波波段，电磁波已不能穿透一般的金属（其趋肤深度 < 1 微米），因而不能有效的利用金属磁性材料（铁钴镍及其合金）于微波技术中。另一方面，铁氧体又属于介电性质材料，在微波波段，其介电常数约为 $8 \sim 16$ ，介电损耗正切约为 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 。因而微波波段的电磁波完全能够贯穿到铁氧体中去。所以，研究微波电磁场和磁性物质的相互作用，只有铁氧体是最好的研究对象。

铁氧体微波器件出现于五十年代初期，在五十年代内出现了多种线性器件，在五十年代末期才搞清楚微波高功率情况下的非线性效应，出现了非线性器件。目前铁氧体微波器件已在雷达、通信、射电天文……等方面得到广泛的应用。对于微波这门科学和技术来说，铁氧体微波器件已成为一个必不可少的而且范围也不算很小的重要组成部分。

在我国，铁氧体微波器件的研制已有二十多年的历史，不少性能良好的器件已在实际中得到了大量的应用，它对微波技术给予了有力的促进，反之，随着微波技术的发展，必然也对微波铁氧体器件提出了愈来愈高的要求。

§ 1 铁磁性能的来源

如果我们将不同的物质放在磁场中，将会发现，有些物质很容易被磁化（铁磁性物质），而有些物质在磁的方面几乎不发生任何作用。人们必然会追述其原因是什么呢？

在生产实践中，发现在各种元素中，只有铁、钴、镍和稀土金属中的钇具有铁磁性，以下我们就以铁为例，来研究一下铁磁性物质磁性的由来。

一、原子磁矩

原子是由原子核和绕核运转的电子所组成，铁原子共有 26 个这样的电子。每一个电子按一定的轨道围绕着原子核运动——即电子的轨道运动。

由于电子本身带负电荷，所以轨道运动的电子便产生一个与运动方向相反的等效电流，由此电流所生的磁性称为轨道磁矩，如图 1 所示。

而每个电子除轨道运动外，还按一定的速度绕自己的轴心作自旋运动，这样产生的磁矩称为自旋磁矩。

在每个原子中具有一定数目的电子，

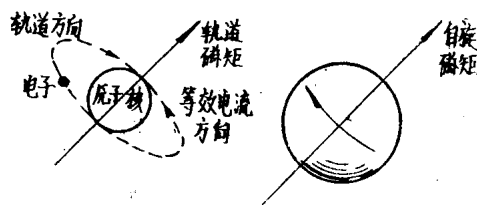


图 1 电子的轨道磁矩和自旋磁矩

根据波尔对原子结构模型的分析，它们所产生的轨道磁矩，几乎是完全相互抵消的，电子的自旋磁矩也是互相抵消。以整个原子来说磁矩应等于零。但是，有一些物质，在它们的原子结构中，电子壳上有不足数的电子。因此，它们的轨道磁矩和自旋矩不能完全相互抵消，而未被抵消的磁矩对外表现出磁性。整个原子对外所产生的磁矩，称为原子的磁矩。

在铁原子中，它有 26 个电子，它们是以原子核为中心分为四个壳层来运行的（如图 2 所示，其中以黑点和空圆代表不同自旋方向的电子）。由图 2 看出，在第一、二、四壳层中，它们都有相同数量的正向和反向自旋电子以及相等相反的轨道磁矩，所以产生的总磁矩为零。唯有在第三壳层上共有 14 个电子，其中 9 个是向一个方向自旋的，5 个是向另一个方向自旋的，这些电子的轨道磁矩也不完全互相抵消，由于这些差额便形成了铁的原子磁矩。

原子磁矩的大小，一般可用磁子来计量。磁子表示一个单独自旋电子所产生的磁矩。由于物质在结晶状态下，原子磁矩的作用要受到相邻原子影响而部分抵消的结果，每个铁原子平均的有效磁矩为 2.22 个磁子，钴原子为 1.71 磁子，镍为 0.6 磁子。

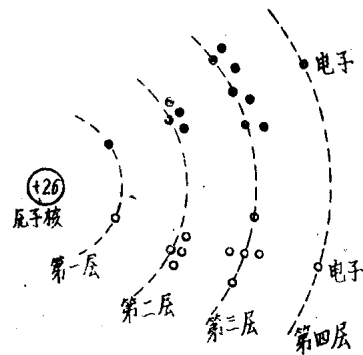


图 2 铁原子的电子运行壳层

二、分子场与交换能

由上述分析看出，原子磁矩乃是铁磁性物质的基本条件。但是并不能说，所有具有原子磁矩的元素都是铁磁性的。例如锰具有原子磁矩，但它没有铁磁性。所以，铁磁性物质除了必须具有原子磁矩外，必须尚有其它条件。

通常对于软磁材料，只要有 1 奥左右强度的磁场便可使其磁化到饱和。但对没有磁性的材料需要 10^7 奥的磁场方有可能使其磁化到同样的程度。所以，我们可以想像，在铁磁物质中，除了在磁化时有外加磁场外，本身尚存在有另一项很强的磁场作用。这项强的磁场只是在铁磁性物质的许多原子结成分子之后方能发生，所以称为分子场。

分子场的来源是由于在物质的结晶结构中，相邻原子的电子间存在着交换相互作用，由于这种相互作用导致了原子系统间的联系着原子磁矩的相同或相反方向取向的两种能量状态，这种能量称为交换能。根据量子力学理论，当交换能为正时，原子磁矩间应有顺平行的相对取向，这便是铁磁性物质的情况，而当交换能为负时，原子磁矩间应有反平行的相对取向，这种情况称为反铁磁性。交换能的大小取决于原子间的距离，若原子之间距离很远，则这项作用力小，相当于通常有原子磁矩，但无铁磁性的情况。图 1-3 表示了由于交换作用所引起两个原子间交换能量与电子间距离的关系，图中横坐标是以

$$V = \frac{\text{原子间的距离}}{\text{自旋磁矩未相互抵消的第三壳层的半径}}$$

表示。由图3看出，只有铁、钴、镍三种金属和稀土元素的Gd固体状态才有正的交换能，也就是说，它们具有铁磁性。

由上述看出，分子场和交换力（交换能是同一事物的两个方面，交换力是形成分子场的原因，分子场是交换力所表现的效应，而实质上铁磁物质的自发磁化是由电子间的交换作用在满足一定条件下产生的结果。

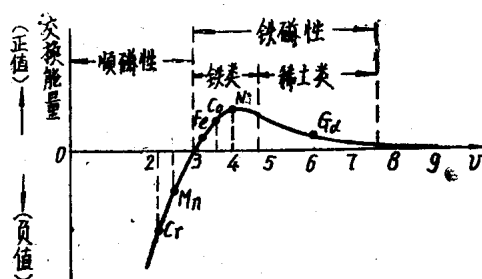


图3 交换作用与原子之间距离的关系

三、居里温度

铁磁物质还有另一项特性，即只有在一定温度之下方具有铁磁性。当温度超过一定数值时，便消失了铁磁性，这一特定温度，便称为居里温度。一些常用金属和磁性化合物的居里温度如下表：

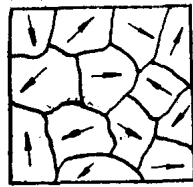
磁性金属元素	居里温度	磁性化合物	居里温度
铁	770°C	锰铁氧体(MnO·Fe ₂ O ₃)	295°C
钴	1130°C	镁铁氧体(MgO·Fe ₂ O ₃)	315°C
镍	358°C	镍铁氧体(NiO·Fe ₂ O ₃)	590°C

铁磁物质具有这一特性的原因，是由于物质中的热骚动使分子运动增强。而热骚动是十分不规则的，因此，它要破坏铁磁物质中交换能的作用（因交换能要保持原子磁矩有规则的平行取向）。当温度升高到居里温度时，热骚动所发生的能量已等于交换力的能量，这便破坏了交换能的作用，结果使材料便不再有铁磁性能。

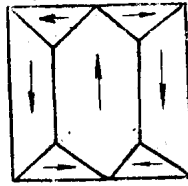
四、磁畴

在一块铁磁材料中，对外它并不具有磁性。但由以上所述，我们知道在铁磁性物质中存在着分子场，它将使原子磁矩自发磁化，从自发磁化角度来看，铁磁物质近似乎应该对外呈现磁性，但事实上还是不符合实际情况的。其原因是分子场不是将整个铁磁性材料中所有原子磁矩都排列在成同一方向。而是在材料中方成许多小块，这称作磁畴（或称自发磁化区域），即表示磁矩能取同一方向的范畴。但不同磁畴间的自发取向是不同的，因之总的看来，在一块铁磁材料中所有磁畴的作用是相互抵消的，所以对外并不表现出磁性、图4表示了几种磁形状图。

任何相邻的磁畴，既然各具有不同的磁化方向，而由于磁矩取向的改变不是能突然间发生的，它们之间便存在着一个过渡层，磁畴在这层物质内，自一个磁畴自发的取向过渡到另一个自发磁化磁畴的方向。这个过渡层称为磁畴壁。图5表示在磁畴中磁矩自一个磁畴的方向过渡到另一个磁畴方向的情况。



(1) 多晶体磁畴



(2) 单晶体磁畴

图4 几种磁畴形状

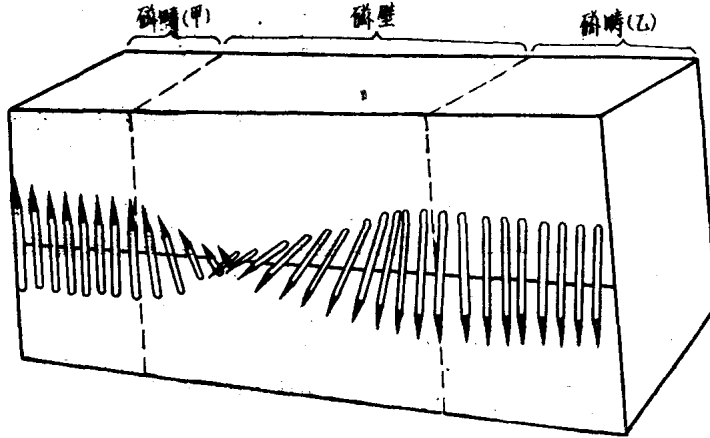


图5 磁畴壁和在畴壁中磁矩过渡变化情况

§ 2 磁化曲线和磁滞回线

一、磁化曲线

所谓磁化，即是在磁性材料中的磁矩受到外加磁场的作用而转到与外加磁场相同方向的过程。当磁性物质中所有磁矩都转到与外磁场方向时，此便称为磁化到了饱和。

如果磁性材料中有磁场 H 作用，就会出现相应的磁感应强度 B 。若起始时材料没磁化，即起始 $H=0$ ， $B=0$ ，以后逐渐增加，由此描绘出的曲线即为磁化曲线，如图6所示。而 B 与 H 间的关系为：

$$B = H + 4\pi M \quad (1)$$

式中 M 为材料的磁化强度，即单位体积内的总磁矩。当 H 足大后， M 达到定一值 M_s ，便不在增加，此后 B 与 H 便成线性关系，即 B 的增加完全由 H 的增加而增加。此时 $4\pi M_s$ 便称为饱和磁化强度，如图6所示。

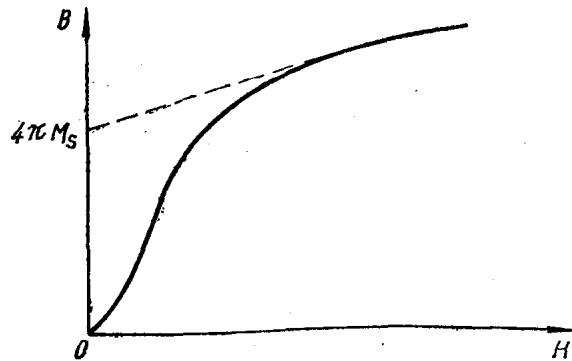


图6 磁化曲线

材料的导磁率 μ 为:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2)$$

或 $\mu = \mu_r \mu_0$

式中 μ_r 为材料的相对导磁率, μ_0 为真空的导磁率。

而材料的磁化率 (或磁化系数) χ 为:

$$\chi = \frac{M}{H} \quad (3)$$

或写为: $\chi = \chi_r \mu_0$ (4)

式中 χ_r 为相对磁化率。

由以上各式可知:

$$\mu = \frac{H + 4\pi M}{H} = 1 + 4\pi \chi \quad (5)$$

二、磁滞回线

如果磁场 H 自零增到一个很强的数值 (如图7中 H_4 值) 后, 逐渐减小磁场时, 材料的磁状态首先沿 bcd 曲线下降, 但当 H 下降到 H_2 以下时, 磁化便沿着另一条曲线变化; 若将 H 降到零, 而磁感应并不降到零而剩一有余值, 即剩磁感应 B_r 。若将磁场反向增加到 H_c 时, 磁感应方降为零。此时的磁场强度 H_c 称为矫顽强度或矫顽力。如果再将磁场变为 H_1 值后回到 H_4 值, 便得出一个表示材料特性的回线, 称作磁滞回线。由于这个回线最大的磁感应是在饱和的状态, 所以 B_s 称为饱和磁感应。 B_r , B_s , H_c 值是表示磁性材料性能的重要指标。这个回线对坐标原点对称的。

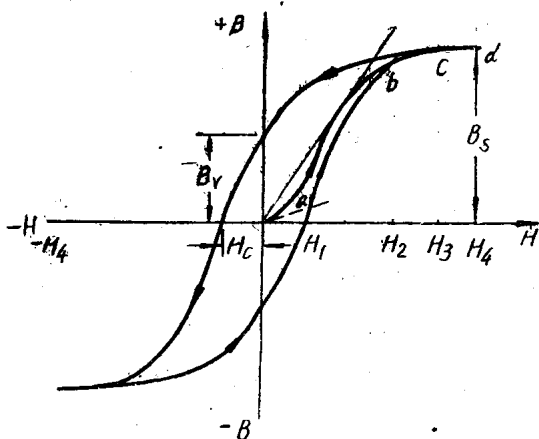


图7 磁化曲线和磁滞回线

当磁场 H 是交变场时, $B-H$ 的变化即沿磁滞回线进行, 如果 H 的振幅不大时, 磁滞回线

与一个椭圆近似的。而对椭圆来说, 当 H 为正弦时, B 亦为正弦变化, 且落后一相角。令:

$$H = h_0 e^{j\omega t}$$

则有: $B = b_0 e^{j(\omega t - \theta)}$

令 $b_0 = \mu h_0 = \mu_0 |\mu_r| h_0$

则 $B = \mu_0 |\mu_r| h_0 e^{-j\theta} e^{j\omega t}$

$\therefore \mu = \mu_0 |\mu_r| e^{-j\theta} = \mu_0 |\mu_r| \cos\theta - j\mu_0 |\mu_r| \sin\theta = \mu' - j\mu''$

由此可知, 在此情况下 μ 是复数。而 μ 和 μ'' 的物理意义可这样解释:

$$B = \mu' h_0 e^{j\omega t} + \mu'' h_0 e^{j\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)}$$

即H产生的B有两部份，一部份与H同相，另一部相位较H落后 90° ，此部份与H之比为 μ'' 。

在磁学中 μ'' 还有另一物理意义：即反复一周时，在材料单位体积中消耗的能量W为：

$$W = \pi \mu'' h^2$$

即W与 μ'' 成正比。

B 的相位落后于 H 表明 M 的相位也落后于 H，由此看出：磁性材料中凡有 M 的相位落后都表明了存在着能量的损耗。

§ 3 铁氧体材料的类型

什么是铁氧体？简单说来，铁氧体是 Fe_2O_3 与其它金属氧化物化合而成的物质，是一种复合氧化物。故铁氧体一定含有铁和氧。

就其化学特性来说，目前常用的铁氧体有下述三种类型：

一、尖晶石型

尖晶石是一种矿物，其分子式可写为 MgAl_2O_4 ，也可写为 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ，属立方晶系。如果以两价之金属氧化物 M^{++}O 代替 MgO ，以 Fe_2O_3 代换 Al_2O_3 ，则可人工制成一系列金属磁性材料，或复合氧化物磁性材料，这就是尖晶石型铁氧体。这类铁氧体的晶体结构与尖晶石的晶体结构相同，普通的化学分子式可写为： $\text{M}^{++}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 或 $\text{M}^{++}\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ，其中 M^{++} 可以是 Mg、Cu、Zn、Ni、Co、Fe 等任何一种，但必须作为二价金属而存在。实用的材料不是单纯的铁氧体而是复合铁氧体，即二价金属不是单纯的一种而是二种或三种。在射频波段多用 Mn-Zn 或 Ni-Zn 铁氧体。而微波波段多用 Mg-Mn 铁氧体或 Mg-Al 铁氧体，

铁氧体中的原子一般是有规则的排列的，这种原子排列叫做晶体结构。在尖晶石或尖晶石型铁氧体中，氧原子成为带负电的二价离子，组成一个所谓面心立方格子，金属原子成为带正电的二价或三价离子，位于氧离子格的间隙中。面心立方格子的间隙有两种：一种是四面体位置，即A位置，此处邻近有四个氧离子，形成一个正四面体（四个面都是全等的正三角形）；一种是所谓八面体位置，即B位置，此处邻近有六个氧离子，形成一个正八面体（八个面都是等正三角形），如图 8 所示。晶胞是原子排列的最小单元（如像砌墙用的砖一样），

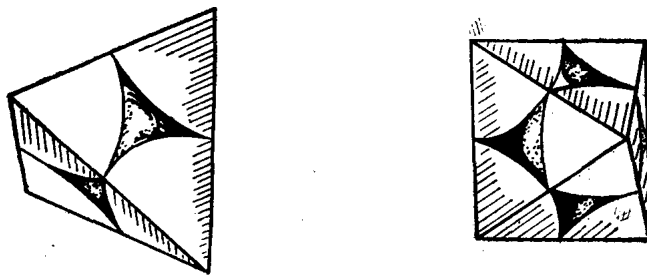


图 8 尖晶石型铁氧体的两种间隙位置

用它可叠成整个的宏观晶体。

在尖晶石铁氧体中，磁性离子（主要是 Fe^{+++} ）常按一定的分配占据A位置和B位置。A位置和B位置中的磁矩的排列可以有多种不同情况，因而产生各种大小不同的磁饱和强度。由此可见，可以用改变磁性离子磁矩大小的办法或改变位置分配的办法来改变饱和磁化强度的大小。这一点对研制铁氧体器件是很有用的，因为不同器件常常需要不同大小的饱和磁化强度。

尖晶石型微波铁氧体材料，主要有镁系、镍系、锰系、锂系等。为了改变材料的饱和磁化强度，可在这些系统中加入铝元素，因而又可以构成镁—铝、锰—铝、镍—铝、锂—铝等系铁氧体。表1给出了在微波波段尖晶石型铁氧体的参数。

表1. 尖晶石系统铁氧体参数

材 料	$4\pi M_s$ (高斯)	ΔH (奥斯特)	ϵ	$tg\delta$	居里温度
$MgFe_2O_4$	1450	900	8.5	0.016	352°C
$MnFe_2O_4$	4800	600	9.3	0.05	302°C
$NiFe_2O_4$	3200	500	8.9	0.017	557°C
$Li_{0.5}Fe_{2.5}O_4$	3700	500	/	10^{-3}	673°C

二、磁铅石型

磁铅石也是一种矿物。天然的磁铅石的成分大致是 $Pb(Fe_{7.5}M_{3.5}Al_{0.5}Ti_{0.5})O_{10}$ ，仿此可人工地制成具有同样晶体结构的 $PbFe_{12}O_{10}$ 、 $BaFe_{12}O_{10}$ 、 $SrFe_{12}O_{10}$ 等磁铅石其中以 $BaFe_{12}O_{10}$ 的实用价值最高，即通常所说之钡铁氧体。钡铁氧体的矫顽力和剩余磁化强度大，故宜作永磁材料，例如用作喇叭的永磁体。在微波波段，由于钡磁之体积小，磁性强，故也常在微波器件中当作磁铁使用，以形成固定的外加偏压静磁场。

三、石榴石型

石榴石也是一种矿物（英文名为 garnet），属立方体系，天然产的成份是 $(Fe \cdot Mn)_3Al_2(SiO_4)_3$ 。用人工的方法以 Fe^{+++} 取代其中的Al和Si，以 Y^{+++} 取代其它金属，则晶结构不变，即得 $Y_3Fe_5O_{12}$ 。这种铁氧体即为通常所说之钇铁石榴石（yttrium iron garnet），简称YIG。这种材料的特点是磁共振峰的峰宽特窄，（10~30奥），介电损耗小（ 10^{-3} - 10^{-4} ），是微波铁氧体器件中应用的一种贵重材料。而近年来在低频段和高功率应用方面几乎全部采用这种材料。在使用中，为了控制饱和磁化强度和线宽，可用其它稀土金属如Gd、Sm等取代一部份Y而构成Y-Gd铁氧体和Y-Sm铁氧体。由于Y、Sm这二种单一铁氧体，其 $4\pi M_s$ 接近，而 ΔH 相差很大，故Y-Sm铁氧体具有饱和磁化强度 $4\pi M_s$ 几乎不变，但谐振线宽 ΔH 却随Sm增加而增大的特点。而Y、Gd这两种单一铁氧体，其 ΔH 相接近，而 $4\pi M_s$ 相差甚大，故Y-Gd铁氧体具有 ΔH 改变不大，而 $4\pi M_s$ 却随Gd的增加而剧烈减小的特点。可以想像到利用这些特点，通过实验，足可得到性能优良和符合需要的复合钇铁石榴石铁氧体。

石榴石型铁氧体又有单晶和多晶之体。所谓单晶，是指在整块晶体内原子的排列都是规则的。在微波铁氧体器件中所用的所谓YIG小球，通常都是单晶，在其表面磨得很光的情况下，其 ΔH 可小到一个奥斯特以下。而所谓多晶，是指在整个晶体中分成许多小区域，每个区域都是单晶区域，而区域之取向是不规则的。这种区域叫做晶粒。有时晶粒的大小也能影响铁氧体的性能。

由上述讨论我们可知，在微波铁氧体器件中，常用的材料为尖晶石型和石榴石型铁氧体，而磁铅石型铁氧体在微波器件中通常仅用来作为永磁体使用。

§ 4 铁氧体的制备工艺

铁氧体的应用特性，主要取决于铁氧体的基本物理特性和内部组织结构特性（如反应物之组成，晶粒形状、大小、气空形状……等）。而制备铁氧体的工艺过程将影响铁氧体的内部结构特性。所以，即使对同一配方，由于工艺过程不同，则产品特性将不同。为此，在研制过程中应寻求特性最好的工艺规范，而在生产过程中应力求工艺的稳定。

铁氧体的制备大体上多为如下几个程序：

一、配料

按照一定的配方（根据过去的实践经验和理论认识决定所需要之化学成分及所用原料），算出各原料的用量，并足够精确的称出用料。

二、研磨

将氧化物或碳酸盐以及适当大小数目的钢球和蒸馏水一并盛入钢罐中，装在球磨机上不不停的转动，使钢球与原料互相冲击，以产生均匀混合和磨细的作用，经20~50小时左右后取出烘干，将所得粉末预压成饼状。

三、预烧

将预压成的饼状混合配料，放入高温炉中加热，以促进固态反应，形成复合氧化物，预烧温度根据材料不同而不同，一般在1050°C~1200°C范围。预烧后基本上已得到所需要的化学成分的铁氧体，但反应不够完全。

四、再研磨

将预烧后饼状复合氧化物，研碎后放入球磨机中再进行研磨。

五、成型

将预烧后再研磨之粉末放在硬质钢的压模中压制成形，一般情况下要求压强达千斤/厘米²左右。

六、烧结

烧结温度一般在 $1000^{\circ}\text{C}\sim 1450^{\circ}\text{C}$ 范围,达到温度后可保温1~十几小时,随材料而异。

七、热处理

根据需要可采用随炉冷却或快速冷却。这一个工序有时不一定需要。

§ 5 铁氧体在微波领域的应用

微波铁氧体器件的用途是非常广泛的,它可以做成无源器件也可以做成有源器件,线性微磁铁氧体器件大体上属于无源器件;而非线性微波器件则有不少是有源器件(由于时数限制,本课程不讨论有源器件)。

目前无源器件应用得最广泛的器件为环行器、隔离器、相移器以及电调滤波器等器件。随着微波铁氧体器件的发展,使得这些器件在微波领域得到了广泛的应用,如在雷达技术中,可采用环行器以及限幅器代替原来的气体发电管的构成双工器,从而可以减小死区,而且具有寿命长、频带宽的优点。而环行器还可用来构成参量放大器以提高雷达的作用距离。用相移器可构成相控阵雷达、从而避免天线的机械转动。且由于构成阵列的天线单元可达成千上万,因而整个雷达可有巨大的辐射功率,大大增加作用距离。相移器还可做成相移调制器而用于卫星通讯地面站的跟踪系统中。

在微波通讯中,为避免邻站之干扰,几乎毫不例外的都采用了隔离器,而工作于不同频带的环行器,则可用作分路元件。

随着微波技术的迅速发展,在六十年代初期出现了新型的微波器件。这类器件的核心部分是YIG单晶,所以通称YIG器件,它包括电调带通滤波器,带阻滤波器、电调固体振荡源、YIG限幅器等器件。。YIG单晶球可以等效地看成一个谐振器,其谐振频率由外加磁场调节。若用它做调谐元件,就可以使本来窄带工作的器件在宽频带内调谐。所以用它做成的微波器件的共同特点是电调谐,调谐范围宽(一到几个倍频程),调谐电流和频率呈线性关系。因此适用于电子对抗、电子干扰和反干扰设备,且具有体积小重量轻、性能稳定、扫频范围宽、跳频速度快,易于自动搜索和锁定、以及噪音低等优点,可以大大提高雷达设备及其它微波系统的自动化程度,并使复杂的系统得到简化。此外,整个YIG器件是全固态化的,无机械运动部件,这也使稳定性得到提高;目前固体雷达正得到飞速发展,可以肯定,在微波集成电路技术中,微带式YIG单晶器件必将获得广泛的运用。