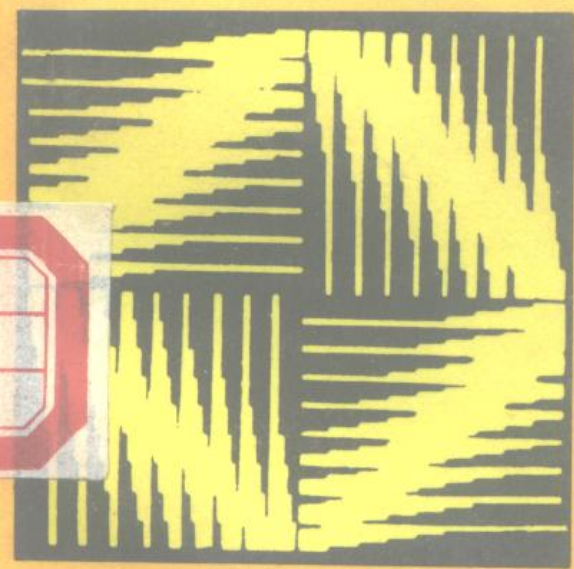


● 电子工业工人技术等级培训教材  
● (磁性材料专业教材)

# 微波铁氧体材料与器件

● 张国荣 主 编  
● 蒋芸美 主 审



电子工业出版社

电子工业工人技术等级培训教材

# 微波铁氧体材料与器件

张国荣 主编

蒋芸美 主审

电子工业出版社

DH40/23  
(京)新登字 055 号

### 内 容 提 要

本书为电子工业微波铁氧体器件专业的工人技术等级培训教材。全书共分六章,分别介绍了微波铁氧体材料,微波铁氧体的基本特性及平面电磁波在铁氧体中的传播特性,隔离器、环行器的基本理论、工作原理以及结构和特点,最后,对新型器件也做了简单的介绍。每章末还附有思考题。

本书语言通俗,内容丰富,图文并茂,既可作为电子类微波铁氧体器件专业的工人技术培训教材和短训班教材,也可供有关专业的工程技术人员参考。

### 微波铁氧体材料与器件

张国荣主编 蒋芸美主审

责任编辑: 张荣琴

\*

电子工业出版社出版

北京市海淀区万寿路 173 信箱(100036)

电子工业出版社发行 各地新华书店经销

北京科技印刷厂印刷

\*

开本:787×1092 毫米 1/32 印张:6.375 字数:149 千字

1995 年 5 月第一版 1995 年 5 月北京第一次印刷

印数:1000 册 定价:10.00 元

ISBN7-5053-2695-3/TN·795

7 5 0 5 3

## 出版说明

为了适应电子科学技术飞速发展,提高电子工业技术工人素质,劳动部与原机械电子工业部于1993年2月颁发了《电子工业工人技术等级标准》。根据新标准,电子工业部组织有关省市电子工业主管部门和企事业单位有关人员成立了“电子整机专业”,“家用电子产品维修专业”,“真空电子器件、接插件、继电器、绝缘介质专业”,“半导体器件及集成电路专业”,“计算机专业”,“磁性材料、电池专业”,“电子元件专业”共7个工人技术培训教材编审委员会。制定了19个专业、311个工种的教学计划、教学大纲。并根据计划大纲的要求,制定了1993~1995年培训教材编审出版规划。列入规划的教材78种和相应的教学录像带若干种。

这套教材的编写是按“技术工人要按岗位要求开展技术等级培训”的要求,以文化课为专业课服务,专业课为提高工人实际操作和分析决定生产实际问题的能力服务为原则。教材既注重了电子工业技术工人要有一定专业理论知识的要求,又克服了以往工人培训教材片面强调理论的倾向;保证了必要的知识传授,又强调了技能培训和解决生产实际问题能力的培养。

这套教材在认真研究了311个工种的共性基础知识要求的基础上,编写了八种统编教材,供311个工种工人进行基础知识培训时选用;并以19个专业为基础,根据每个专业共性的专业知识、专业技能编写了70种教材供311个工种工人进行专业知识、专业技能培训时使用。

每种教材在反映初、中、高三级技术工人培训的不同要求

的基础上,注意了基础知识、专业知识、专业技能培训的系统性。因此,多数教材是初、中、高三级合在一起的,更好地体现由浅入深、由低及高的教学规律。

在教材编写上,针对工人培训的特点,突出教材的实用性、针对性,力求文字简练、通俗易懂。内容上紧密结合教学大纲要求,在讲授理论知识的同时还注意了对生产工艺和操作技能的要求,使教师易于施教,工人便于理解和操作。知识性强的教材,每章后配有练习题和思考题,以便巩固应掌握的知识。技能性强的教材,配有适当的技能训练课目,以便提高工人操作技能。在有关工艺和设备的教材中,主要介绍了通用性较强的内容和典型产品、设备,对于使用这类教材的工厂企业,由于各自的产品、设备不同可酌情自编相应的补充讲义与教材结合起来进行培训。另外,为适应技术发展、工艺改革、设备更新的需要,这套教材在编写中还注意了新技术、新工艺、新设备及其发展趋势,以拓宽工人的知识面。

参加这套教材编审工作的有北京、天津、上海、江苏、陕西五省市电子工业主管部门和河北、河南、山东、山西、辽宁、江西、四川、广东、湖南、湖北等十个省市的有关单位的专家、教师、技术人员等。在此谨向为此付出艰辛劳动的全体编审人员和各地、各单位支持这项工作的领导表示衷心感谢。

由于电子工业的迅速发展,这套教材的涉及面广、实用性强,加之编写时间仓促,教材中肯定有不妥之处,恳请使用单位提出宝贵意见,以便进一步修订,使之更加完善。

电子工业部

1993年7月

## 前 言

本教材系按电子工业部电子元件类技术工人培训教材编审小组征稿,编审出版。本教材由八九八厂张国荣高级工程师主编,由七九八厂蒋芸美高级工程师主审。

本教材根据微波铁氧体材料与器件专业技术工人培训教学大纲要求编著。课程学时为50~70小时。课程主要内容分为微波铁氧体材料和微波铁氧体器件两部分。第一章微波铁氧体;本章主要讨论微波铁氧体材料,通过学习基本上可以掌握微波铁氧体的基础知识、晶体结构、成分及各种常用的微波铁氧体材料与电磁参数,以便根据器件的不同要求,合理选择铁氧体材料与磁化要求。第二章微波铁氧体的基本特性;第三章微波铁氧体中电磁波传播的基本理论;这两章主要讨论微波铁氧体的基本磁特性及平面电磁波在铁氧体中的传播特性,为学习微波铁氧体器件打下必要的基础知识。第四章隔离器;第五章环行器;通过这两章的学习基本上掌握了各种常用的隔离器、环行器基本理论、工作原理、器件的结构和特点。第六章为新型器件,作为参考教材。

本教材编写时尽量避免繁杂的数学推导,力求从物理概念上阐述。由于编者水平有限,难免有一些错误,殷切希望广大读者批评指正。

编者 1993年12月

# 目 录

<b>第一章 微波铁氧体</b> .....	( 1 )
第一节 微波铁氧体简介.....	( 1 )
第二节 微波铁氧体晶体结构及其成分.....	( 3 )
第三节 微波铁氧体磁参数.....	( 7 )
第四节 微波铁氧体材料.....	(10)
第五节 微波铁氧体材料选择.....	(27)
<b>第二章 微波铁氧体的基本特性</b> .....	(32)
第一节 单电子自由进动.....	(32)
第二节 微波铁氧体的张量磁导率和铁磁共振现象.....	(35)
第三节 圆极化波下的标量磁导率.....	(40)
第四节 微波铁氧体的内直流磁场.....	(41)
第五节 未饱和磁化铁氧体中的低场损耗.....	(44)
第六节 微波铁氧体外偏磁场的选择.....	(47)
第七节 微波铁氧体的非一致进动.....	(49)
第八节 自旋波及其频谱.....	(50)
第九节 高功率非线性效应.....	(54)
<b>第三章 微波铁氧体中电磁波传播的基本理论</b> .....	(60)
第一节 均匀平面波在无限大铁氧体中的传播特性.....	(60)
第二节 纵向磁化铁氧体中平面波的传播, 法拉第旋转效应.....	(63)

第三节	横向磁化铁氧体中平面波的传播， 双折射效应·····	( 65 )
第四节	圆形波导中置有纵向磁化铁氧体圆 棒的传播特性·····	( 67 )
第五节	矩形波导中置有横向磁化铁氧体片 的传播特性·····	( 68 )
<b>第四章</b>	<b>隔离器</b> ·····	( 71 )
第一节	法拉第旋转隔离器·····	( 73 )
第二节	场移式隔离器·····	( 75 )
第三节	谐振式隔离器·····	( 82 )
第四节	边导模隔离器·····	( 90 )
<b>第五章</b>	<b>环行器</b> ·····	( 94 )
第一节	差相移式环行器·····	( 95 )
第二节	结环行器·····	( 102 )
第三节	波导结环行器·····	( 108 )
第四节	带线结环行器·····	( 114 )
第五节	集中元件结环行器·····	( 135 )
第六节	微带结环行器·····	( 148 )
第七节	结型锁式环行器·····	( 153 )
<b>第六章</b>	<b>新型隔离器、环行器</b> ·····	( 159 )
第一节	矩形波导一同轴转换隔离器·····	( 159 )
第二节	矩形波导一同轴结环行器·····	( 164 )
第三节	脊波导隔离器、环行器 ·····	( 166 )
第四节	单片电路应用的超薄片式微带环行 器、隔离器 ·····	( 174 )
第五节	槽线隔离器、环行器 ·····	( 182 )
第六节	鳍线隔离器、环行器 ·····	( 187 )



0  
1  
2

附录 基本电磁量单位制换算表..... (193)  
主要参考书目..... (194)

# 第一章 微波铁氧体

## 第一节 微波铁氧体简介

铁氧体是铁和其它一种或多种适当的金属元素组成的复合氧化物。铁氧体又称磁性瓷,其生产过程及其外观类似于陶瓷,其导电性属半导体,电阻率一般为  $10^2 \sim 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ 。金属或合金磁性材料电阻率为  $10^{-6} \sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 。在介电性能方面,铁氧体具有磁性介质特性,在微波频段其介电常数约为  $8 \sim 16$ ,介电损耗正切  $\text{tg}\delta$  为  $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 。在基本内禀磁性方面,铁氧体的饱和磁化强度  $4\pi M_s$  为  $200 \sim 5500 \times 10^{-4} \text{T}$ ,覆盖了微波频谱的大部分。居里温度约在  $100^\circ\text{C} \sim 600^\circ\text{C}$  范围内。

人们最早接触到的铁氧体是  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的磁铁矿,它具有一个立方晶格的尖晶石结构,类似于天然尖晶石矿  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  同型的分子结构。因此,尖晶石型铁氧体就是指  $\text{MFe}_2\text{O}_4 = \text{MO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  的金属氧化物和三氧化二铁的复合物,其中 M 为二价金属离子。

迄今为止,铁氧体的晶体结构主要有三种类型:尖晶石型、石榴石型和磁铅石型。

按照铁氧体的特性和用途可以将铁氧体分为软磁、恒磁、矩磁、旋磁和压磁五大类。微波铁氧体就是指旋磁铁氧体,应用于微波的旋磁铁氧体除了上述的尖晶石型外,还有石榴石型和磁铅石型。

在制备石榴石型铁氧体时,发现有钙钛石矿石结构存在,其分子式为  $MFeO_3$ , 后经研究发现这些铁氧体中确实存在着两种晶体,一种为钙钛石相,另一种是分子式为  $M_3Fe_5O_{12}$  的石榴石相。

目前,尖晶石型和石榴石型铁氧体已被广泛地用来制作各种微波铁氧体器件,如隔离器、环形器、相移器等,而磁铅石型铁氧体则局限于毫米波器件的制作中。

微波铁氧体的制备类似于陶瓷材料,其制作过程如下:

原料 → 原材料处理 将各种氧化物置于  $100^\circ\text{C}$  烘箱内烘干  
 → 配料 按一定的化学成分(配方)称出各种氧化物的重量  
 → 第一次球磨 将称量好的料和一定比例的水(或酒精)、钢球倒入球磨罐中,放在球磨机上球磨 24 小时  
 → 预烧 将球磨均匀后的料倒入瓷盘中置于烘箱内烘干,然后预压成型,放入高温炉中预烧成局部反应的铁氧体复合物。预烧温度一般低于烧结温度约  $200^\circ\text{C}$  左右  
 → 第二次球磨 将预烧后的铁氧体复合物粉碎,再进行第二次球磨磨细  
 → 成型 在磨细的

表 1-1

铁氧体	X 射线密度 $\text{g}/\text{cm}^3$	饱和磁化强度 $4\pi M_s \times 10^{-4}\text{T}$
$\text{MnFe}_2\text{O}_4$	5.00	5200
$\text{MgFe}_2\text{O}_4$	4.52	1400
$\text{NiFe}_2\text{O}_4$	5.38	3300
$\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$	4.75	3130
$\text{CoFe}_2\text{O}_4$	5.29	1500
$\text{CuFe}_2\text{O}_4$	5.38	1700
YIG	5.17	1800

料中加入一定比例的粘合剂,造粒,然后放在成型模具里加压成型 → 烧结 烧结温度在  $1000 \sim 1500^\circ\text{C}$  范围内,烧结成毛

坯样品——>样品研磨将毛坯样品研磨成所需的尺寸。

一般采用这种陶瓷工艺制备的铁氧体样品的典型密度在 X 射线密度的 80~95% 之间,如果制备工艺精细,99% 的理论密度也是能达到的。表 1-1 给出了通常使用的部分尖晶石、石榴石型铁氧体的 X 射线密度和饱和磁化强度  $4\pi M_s$ 。

## 第二节 微波铁氧体晶体结构及其成分

微波铁氧体器件所应用的旋磁铁氧体的晶体结构主要有三种类型:尖晶石型、石榴石型和磁铅石型,分别相应于天然尖晶石型  $MgAl_2O_4$ ,天然石榴石型  $(Fe, Mn)_3Al_2(SiO_4)_3$  和天然磁铅石型  $Pb(Fe_{7.5}Mn_{3.5}Al_{0.5}Ti_{0.5})O_{19}$ ,与其有同一类型的晶体结构。

尖晶石型铁氧体的分子式是  $MFe_2O_4$ ,其中常用的二价金属阳离子  $M$  为  $Ni^{2+}$ 、 $Mn^{2+}$ 、 $Fe^{2+}$ 、 $Co^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  等。尖晶石铁氧体的晶格是一个面心立方结构,每个晶胞有 8 个分子,  $M_8Fe_{16}O_{32}$ ,有阳离子 24 个和氧离子 32 个。每个晶胞内有 8 个小立方体,每两个共面的小立方体是属于不同类型的结构,每两个共边的小立方体是属于同类型结构的。因此,这 8 个小立方体每种各为 4 个,每个小立方体内包括 4 个氧离子,约位于立方体内对角线中点与顶点的中心,故每个晶胞的大立方体包括  $8 \times 4 = 32$  个氧离子。金属阳离子是夹在密堆的氧离子空隙内,这种间隙可分为两类:第一类间隙较小,被 4 个氧离子所包围着的,称为  $A$  位置,它是四面体的中心, $A$  位置共 64 个。另一类间隙较大,被 6 个氧原子所包围着的,称为  $B$  位置,它是八面体中心, $B$  位置共有 32 个。图 1-1 和图 1-2 分别表示  $1/8$  个小立方体内的四面体和八面体的位

置。

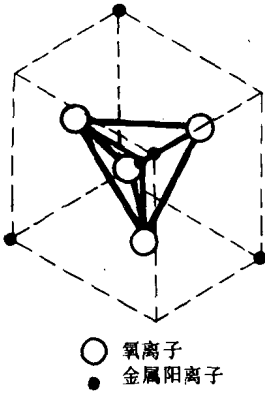


图 1-1 1/8 个小立方体内的四面体

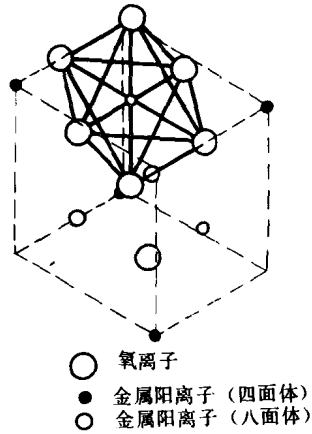
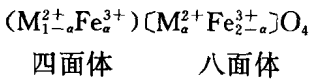


图 1-2 1/8 个小立方体内的八面体

尖晶石铁氧体的每个晶胞内有 96 个间隙,其中只有 8 个 A 位置和 16 个 B 位置被金属阳离子所占据,尚有 3/4 是空位置。由于 A、B 位置不能全被阳离子所占据,存在着阳离子的缺位,所以尖晶石中的两种金属阳离子都有可能占据 A 位置或 B 位置,一般可表示为:



如果  $\alpha=0$ ,尖晶石铁氧体为正型分布  $(M^{2+}) (Fe_2^{3+}) O_4$ 。

如果  $\alpha=1$ ,尖晶石铁氧体为反型分布  $Fe^{3+} (M^{2+} Fe^{3+}) O_4$ 。

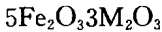
实际上,  $0 < \alpha < 1$ ,例如



尖晶石铁氧体的离子分布必须满足金属阳离子数之和为 3,价之和为 8。要用理论来推断阳离子的分布是困难的。目

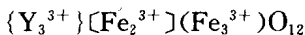
前,从对各种尖晶石铁氧体中离子分布的实验结果来看,这些金属阳离子占据  $A$  位置或  $B$  位置的相对优势程度可由下列顺序表示:  $Zn^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$ 、 $Ga^{3+}$ 、 $In^{2+}$ 、 $Mn^{3+}$ 、 $Fe^{3+}$ 、 $Mn^{2+}$ 、 $Fe^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$ 、 $Co^{2+}$ 、 $Ti^{4+}$ 、 $Ni^{2+}$ 、 $Cr^{3+}$ 。排在愈前面的越易占据  $A$  位置,愈在后面的,表示占据  $B$  位置的优势愈强。

石榴石型铁氧体属于体心立方结构,通式为:



其晶体结构与尖晶石型晶体结构不同,区别有两个。第一是,石榴石晶体结构中的金属阳离子有三种位置,而尖晶石晶体结构中的金属阳离子只有两种位置;第二是,石榴石晶体结构中三种阳离子位置均为充满的,而尖晶石晶体结构中两种阳离子位置有  $3/4$  是空位置,没有被金属阳离子充满。因此,石榴石晶体比较致密,磁损耗小,电阻率也比尖晶石的高。

石榴石通式中的  $M$  金属离子为钇( $Y$ )或其它稀土金属离子。石榴石铁氧体中最重要的一种是钇铁石榴石,简称 YIG,其分子式为  $Y_3Fe_5O_{12}$ 。每个晶胞有 8 个分子  $Y_{24}Fe_{40}O_{96}$ ,其中氧离子排列成三种间隙:最小间隙是四面体,有 24 个;稍大的间隙是八面体,有 16 个;最大的间隙是十二面体,有 24 个。40 个铁离子分别占据 24 个四面体中心间隙和 16 个八面体中心间隙,24 个钇离子占据十二面体中心间隙。以上三种晶格位置分别称为  $24c$ (十二面体), $16a$ (八面体), $24d$ (四面体),分别用  $\{\}$ 、 $\square$  及  $( )$  表示  $c$ 、 $a$ 、 $d$  位置。则  $Y_3Fe_5O_{12}$  分子式可表示为:



通过离子取代如用  $Ca$ 、 $Th$ 、 $Sr$ 、 $La$ ( $c$ -位置) 代换一部分  $Y$ ,用  $Ti$ 、 $Sn$ 、 $Zr$ 、 $In$ ( $a$ -位置) 和  $Si$ 、 $Ge$ 、 $V$ ( $d$ -位置) 代换  $Fe$ ,就可以获得各种性能要求的复合石榴石型铁氧体。

磁铅石型铁氧体是指具有与天然磁铅石  $\text{Pb}(\text{Fe}_{7.5}\text{Mn}_{3.5}\text{Al}_{0.5}\text{Ti}_{0.5})\text{O}_{19}$  相似晶体结构的一类晶体,它属于六角晶系,并具有单轴各向异性。六角晶系材料根据材料的易磁化轴的方向,分为从优方向材料和从优平面材料。

从优方向材料谐振频率为:

$$f = \gamma(H_A + H_0) \quad (1.1)$$

这种材料的易磁化轴平行于六角晶轴,属于单轴各向异性,用符号“ $\uparrow$ ”表示。

从优平面材料谐振频率为:

$$f = \gamma \sqrt{(H_A + H_0)H_0} \quad (1.2)$$

这种材料的易磁化轴位于垂直于六角晶轴的平面内,用符号“ $\perp$ ”表示。式中,  $\gamma = 2.8 \times \left(\frac{4\pi}{10^3}\right) \text{MHz}/(\text{A/m})$ ,  $H_0$  为外加恒稳磁场,  $H_A$  为磁结晶各向异性场。显然,从优方向材料与从优平面材料相比较,如果  $H_A$  相等,则从优方向材料有高得多的谐振频率。其中,最基本的一类是  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  钡铁氧体,它是一种硬磁铁氧体,称为 M 型。此外,尚有晶体结构稍有不同的 W、Y、Z、U 型。常用的四种磁铅石型的晶体结构如下:

类型	分子式
M	$\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19} \uparrow$
W	$\text{BaMe}_2^{2+}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27} \uparrow$
Y	$\text{Ba}_2\text{Me}_2^{2+}\text{Fe}_{12}\text{O}_{22} \perp$
Z	$\text{Ba}_3\text{Me}_2^{2+}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41} \uparrow$

分子式中 Me 为 Mn、Fe、Co、Ni、Zn、Mg 等。当式中  $\text{Me}^{2+}$  离子由 Co 离子全部或部分地取代后,随着  $\text{Co}^{2+}$  离子的增加,各向异性场  $H_A$  下降,使从优方向材料转变为从优平面材料。

磁铅石型铁氧体属六角晶系,并且具有单轴各向异性,它

的特性为一种高磁晶体各向异性,利用这种高磁各向异性场就可以在铁氧体中产生一个内磁场,使其在无外恒稳磁场或者很小恒稳磁场时,在毫米波频率下产生铁磁共振。磁铅石型铁氧体主要用于毫米波谐振式隔离器。

### 第三节 微波铁氧体磁参数

表征微波铁氧体性能指标的最重要的参数有如下几个:

一、饱和磁化强度  $4\pi M_s$ :表示单位体积的饱和磁矩,通常在  $200\sim 5500\times 10^{-4}\text{T}$ ,覆盖了微波频谱的大部分。

二、居里温度  $T_c$ :表示磁矩为零的温度,也就是铁氧体的亚铁磁性转变为顺磁性的温度,通常在  $100^\circ\text{C}\sim 600^\circ\text{C}$  范围内。居里温度  $T_c$  直接影响微波铁氧体器件的温度稳定性,居里温度  $T_c$  的高低决定了铁氧体材料饱和磁化强度  $4\pi M_s$  随温度变化的斜率,即  $\Delta M/\Delta T$ 。尤其在工作温度变化大及高功率的情况下,必须考虑铁氧体材料的  $\Delta M/\Delta T$  的变化值。

三、电阻率  $\rho$  和介电损耗正切  $\text{tg}\delta$ :表征了微波铁氧体材料总的损耗除磁损耗外,还包含了介电损耗。介电损耗一般可分为两部分,即传导损耗和极化损耗。介电损耗主要与  $\text{Fe}^{2+}$  离子有关。随着  $\text{Fe}^{2+}$  离子的增加,电阻率  $\rho$  下降,介电损耗正切  $\text{tg}\delta$  增加。所以,在实际工作中,往往通过对微波铁氧体的直流电阻率  $\rho$  及  $30\text{MHz}$  时  $\text{tg}\delta$  的间接测量来衡量微波铁氧体的介电损耗。为了精确起见,可以直接在微波频率下测试  $\text{tg}\delta$ 。

四、相对介电常数  $\epsilon_r$ :表示铁氧体材料固有的介质电容量率。 $\epsilon/\epsilon_0=1+\chi_e=\epsilon_r$ ,式中  $\epsilon_0$  为真空电容率, $\chi_e$  为极化率。微波铁氧体材料的相对介电常数一般为  $8\sim 16$ 。相对介电常数  $\epsilon_r$



对微波铁氧体器件的微波特性有较大的影响,如可直接用于计算样品的直径及器件的匹配。

五、铁磁共振线宽  $\Delta H$ :  $\Delta H$  值的大小是衡量铁磁共振时磁损耗的一个重要参数。铁磁共振线宽  $\Delta H$  是由铁氧体内部的机理决定的,并与磁矩进动时的阻尼系数  $\alpha$  有关,其表达式通常可表述如下:

$$\begin{aligned} \Delta H &= \Delta H_{\text{内蒙}} + \Delta H_{\text{弛豫}} + \Delta H_{\text{各向异性}} + \Delta H_{\text{气孔}} + \Delta H_{\text{表面}} \\ &= \frac{2\alpha\omega_0}{\gamma} \end{aligned} \quad (1.3)$$

式中  $\Delta H_{\text{内蒙}}$  线宽决定于自旋~自旋耦合;  $\Delta H_{\text{弛豫}}$  决定于铁氧体内快速弛豫离子的存在;  $\Delta H_{\text{各向异性}}$  要求磁结晶各向异性场为零;  $\Delta H_{\text{气孔}}$  要求气孔和磁孔为零;  $\Delta H_{\text{表面}}$  要求表面抛光。

对于利用铁磁共振吸收现象制作的谐振式隔离器,或者是在高于共振磁场工作的器件来说,希望  $\Delta H$  小。对于在低于共振磁场工作的器件来说,不仅要求共振线宽  $\Delta H$  小,而且要求共振峰的尾部及低场时的损耗愈小愈好,如图 1-3 所示。

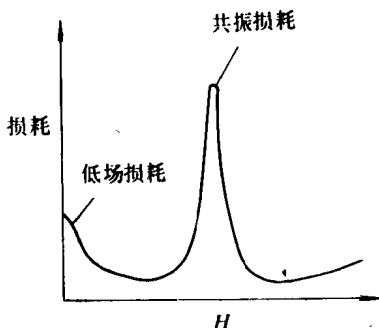


图 1-3 器件工作区域的磁场与损耗关系

六、有效线宽  $\Delta H_{\text{有效}}$ : 我们在实际工作中经常会碰到这样一种情况,即铁磁共振线宽  $\Delta H$  小的铁氧体材料用在器件中,