

73.761.32
703

毫米波铁氧体器件理论与技术

窦文斌 孙忠良 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

毫米波铁氧体器件理论与技术/窦文斌,孙忠良. —北京:
国防工业出版社,1996.2

ISBN 7-118-01540-7

I. 毫… I. ①窦… ②孙… II. ①微波铁氧体器件-理
论 ②毫米波环形器-理论 N. ①TN61 ②TN621

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 17798 号

D024/06

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 8 $\frac{5}{8}$ 223 千字

1996 年 2 月第 1 版 1996 年 2 月北京第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:13.40 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由**国防科技图书出版基金**资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列出出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版,随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允

曾铎

秘书长 刘琯德

委员 尤子平 朱森元 朵英贤

(按姓氏笔划为序) 刘仁 何庆芝 何国伟

何新贵 宋家树 张汝果

范学虹 胡万枕 柯有安

侯迁 侯正明 莫悟生

崔尔杰

前 言

铁氧体器件理论与技术研究已有几十年的历史。60年代,美国麻省理工学院 Lax 和 Button 教授出版了他们的名著“Microwave Ferrite and Ferrimagnetics”(McGraw—Hill Book Company, New York, 1962),全面地研究了铁氧体的物理性质,电磁波在铁氧体中的传播,以及有关的测量技术,并讨论了许多铁氧体器件。该书是50年代至60年代初这方面研究工作的全面总结和概括。我国学者在50年代就开展了微波铁氧体理论与技术的研究,有关工作及成果曾刊载于有关期刊文献及微波理论与技术方面的著作中。80年代,蒋仁培研究员、魏克珠高级工程师出版了他们的专著《微波铁氧体理论与技术》(科学出版社,北京,1984年),对他们过去几十年的研究工作作了全面总结。

80年代以来,毫米波理论与技术的研究工作取得了极大进展,作为它的一个重要方面,毫米波铁氧体器件理论与技术也取得很大进步。由于目前铁氧体材料参数主要是饱和磁化强度不能达到相应频段所需的值(最大为0.53T),把传统微波铁氧体器件按简单频率缩比关系向毫米波频段移植并不能获得所希望的性能,因此需要采用新的方法来设计铁氧体器件,发展新型铁氧体器件。作者在这方面进行了多年的研究工作,并基于自己的研究成果和国内外最新研究成果著成此书,以期对这方面近十年来的研究进展给出较完整的总结。

本书共分九章,第一章和第二章为基础知识,第三章阐述波导结环行器理论,第四章介绍各种集成结环行器,第五章论述法拉第旋转器件,第六章和第七章分别叙述分布式非互易器件和铁氧体加载传输线,第八章简要介绍磁调器件的进展,第九章阐述与天线和散射相关的问题。

电子科技大学林为干教授、院士,饶克瑾教授,中国科技大学徐善驾教授审阅了部分初稿,并对作者给予热情鼓励和支持,在此表示衷心的感谢。国防工业出版社对本书的出版给予了积极的支持,在这里向他们致以深深的谢意。研究生荣昱、沈涛参加了本书的部分研究工作;此外,书中引用了国内外许多学者发表的文章和著作,在此一并致谢。

限于作者水平,书中会有错误、不当之处,恳请读者批评指正。

作 者

内 容 简 介

铁氧体器件是毫米波工程中广泛应用的重要元件。在工作频率远高于微波频段,铁氧体材料参数主要是饱和磁化强度不能相应增加的情况下,需要采用新的方法来设计铁氧体器件,并发展新型的铁氧体器件。本书分9章,系统地介绍铁氧体旋磁性,波导结环行器,各种集成结环行器,波导法拉第旋转器件和准光法拉第旋转器件,分布式非互易器件,铁氧体加载传输线,磁调器件以及天线与散射方面的理论与技术。该书内容基本上反映了国内外近十年来在这方面的研究进展。

本书可供从事电磁场与微波技术、电子物理与器件和雷达等专业的工程技术人员阅读,也可作为高等院校有关专业研究生和本科生参考书。

ISBN 7-118-01540-7/TN·252

定价:13.40元

目 录

第一章 铁氧体旋磁性	1
1.1 磁导率张量	1
1.2 任意磁化方向的张量磁导率	5
1.3 铁氧体材料用于毫米波频段的局限	8
参考文献	9
第二章 电磁波传播与电磁场方程	10
2.1 电磁波在无限大铁氧体媒质中的传播	10
2.2 铁氧体媒质中的电磁场方程	13
参考文献	17
第三章 波导 Y 结环行器	18
3.1 Y 结环行器的网络理论	19
3.2 H 面波导 Y 结环行器场理论	25
3.3 波导弯头对环行器性能的影响	45
3.4 高功率波导结环行器	51
3.5 W 波段结环行器——高阶模概念与应用	54
3.6 满高度铁氧体结环行器	58
3.7 本征模、结谐振模及其特性与应用	73
3.8 场图	86
3.9 E 面波导结环行器	89
3.10 波导结环行器的其他结构和理论处理	93
参考文献	93
第四章 其他 Y 结环行器	96
4.1 微带环行器	96
4.2 带线环行器	103
4.3 鳍线 Y 结环行器	106

4.4 非辐射介质波导环形器	108
参考文献	111
第五章 法拉第旋转器件	113
5.1 部分填充纵向磁化铁氧体的不规则波导	113
5.2 准光环行器和隔离器	125
5.3 小结	151
参考文献	151
第六章 分布式非互易器件	153
6.1 耦合模理论	154
6.2 分布式非互易结构的网络理论	161
6.3 分布式非互易器件的实现	165
参考文献	173
第七章 铁氧体加载传输线	174
7.1 模式—S 矩阵法	174
7.2 传输特性分析与本征函数确定	182
7.3 移相器和隔离器	193
7.4 滤波器	200
7.5 其他处理方法	203
参考文献	204
第八章 磁调器件	205
8.1 六角晶系铁氧体小球毫米波滤波器	205
8.2 LAF 铁氧体小球滤波器	210
8.3 YIG 薄膜调谐振荡器	214
参考文献	214
第九章 天线与散射	216
9.1 接地各向异性板上点源的辐射	216
9.2 邻近各向异性板点源的辐射	229
9.3 铁氧体相扫天线	236
9.4 各向异性介质层对平面波的散射	238
9.5 各向异性介质柱对高斯束的散射	255
参考文献	263

第一章 铁氧体旋磁性

1.1 磁导率张量

铁氧体器件是微波、毫米波工程中一类用途广泛的重要元件,它对交变场表现出的各向异性是由于磁化铁氧体的磁导率为张量。

分析指出,当直流磁场在 z 方向使铁氧体达到饱和磁化时,射频磁化强度 m 和射频磁场强度 h ,通过磁化率张量相联系:

$$m = \mu_0 \chi \cdot h \quad (1.1)$$

式中

$$\chi = \begin{bmatrix} \chi_{xx} & \chi_{xy} & 0 \\ \chi_{yx} & \chi_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

$$\chi_{xx} = \chi_{yy} = \frac{\omega_m \omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (1.3)$$

$$-\chi_{yx} = \chi_{xy} = -j \frac{\omega \omega_m}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (1.4)$$

$$\omega_m = \frac{\gamma M_0}{\mu_0} \quad (1.5)$$

$$\omega_0 = \gamma H_0 \quad (1.6)$$

其中 γ 为旋磁比常数,其值为 $2.21 \times 10^5 \text{ rad/A} \cdot \text{m}$; M_0 为饱和磁化强度; H_0 为直流磁场强度。磁化率张量元素在 $\omega = \omega_0$ 时有奇异性。这是表示谐振吸收出现的频率,用于设计谐振式器件的基本依据。现在可以导出磁导率张量 μ , 因为

$$b = \mu_0 h + m \quad (1.7)$$

或

$$b = \mu_0 \mu \cdot h \quad (1.8)$$

式中 $\mu = I + \chi$ (1.9)

或
$$\mu = \begin{bmatrix} \mu_{xx} & \mu_{xy} & \mu_{xz} \\ \mu_{yx} & \mu_{yy} & \mu_{yz} \\ \mu_{zx} & \mu_{zy} & \mu_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu & -j\kappa & 0 \\ j\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

式(1.9)中 I 为单位矩阵,即外加磁场在 z 方向且饱和磁化时有:

$$\mu_{xx} = \mu_{yy} = \mu = 1 + \chi_{xx}, \quad \mu_{zz} = \mu_z = 1 \quad (1.11)$$

$$-\mu_{xy} = \mu_{yx} = j\kappa = -\chi_{xy}, \quad \mu_{xz} = \mu_{yz} = \mu_{zx} = \mu_{zy} = 0 \quad (1.12)$$

磁导率张量 μ 是磁感应强度 b 和磁场强度 h 关系的表述。 μ 、 κ 分别为磁导率张量 μ 的对角元素和非对角元素。这个关系意味着在某一方向的磁场会产生与它相垂直的方向上的磁感应和与它相平行方向上的磁感应即所谓旋磁性。

如果恒定磁场在 y 方向,可得磁导率张量为:

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu & 0 & j\kappa \\ 0 & 1 & 0 \\ -j\kappa & 0 & \mu \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

如果恒定磁场在 x 方向,则

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -j\kappa \\ 0 & j\kappa & \mu \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

式(1.10), (1.13) 和 (1.14) 可扩展到广义正交坐标系 (u, v, w) 。

当考虑铁氧体存在损耗时,磁化率张量元素为:

$$\chi_{xx} = \chi_{yy} = \frac{(\omega_0 + j\omega\alpha)\omega_m}{(\omega_0 + j\omega\alpha)^2 - \omega^2} \quad (1.15)$$

$$-\chi_{yx} = \chi_{xy} = -j \frac{\omega\omega_m}{(\omega_0 + j\omega\alpha)^2 - \omega^2} \quad (1.16)$$

式中 α 为阻尼因子。把实虚部分开,可得张量元素的色散部分和耗散部分分别为:

$$\chi_{xx} = \chi'_{xx} - j\chi''_{xx} \quad (1.17a)$$

$$\chi'_{xx} = \frac{\omega_0 \omega_m (\omega_0^2 - \omega^2) + \omega_m \omega_0 \omega^2 \alpha^2}{[\omega_0^2 - \omega^2 (1 + \alpha^2)]^2 + 4\omega_0^2 \omega^2 \alpha^2} \quad (1.17b)$$

$$\chi''_{xx} = \frac{\omega \alpha \omega_m [\omega_0^2 + \omega^2 (1 + \alpha^2)]}{[\omega_0^2 - \omega^2 (1 + \alpha^2)]^2 + 4\omega_0^2 \omega^2 \alpha^2} \quad (1.17c)$$

$$\chi_{xy} = \chi'_{xy} - j\chi''_{xy} \quad (1.18a)$$

$$\chi''_{xy} = - \frac{2\omega_0 \omega_m \omega^2 \alpha}{[\omega^2 - \omega^2 (1 + \alpha^2)]^2 + 4\omega_0^2 \omega^2 \alpha^2} \quad (1.18b)$$

$$\chi'_{xy} = \frac{\omega \omega_m [\omega_0^2 - \omega^2 (1 + \alpha^2)]}{[\omega_0^2 - \omega^2 (1 + \alpha^2)]^2 + 4\omega_0^2 \omega^2 \alpha^2} \quad (1.18c)$$

这里的阻尼因子 α 可以和铁氧体线宽联系起来。线宽通常定义为：当频率固定在 ω 时，磁化率张量的对角元素 χ_{xx} 的虚部 χ''_{xx} 取值为它在谐振点处值的一半时磁场值之差（见图 1.1）。

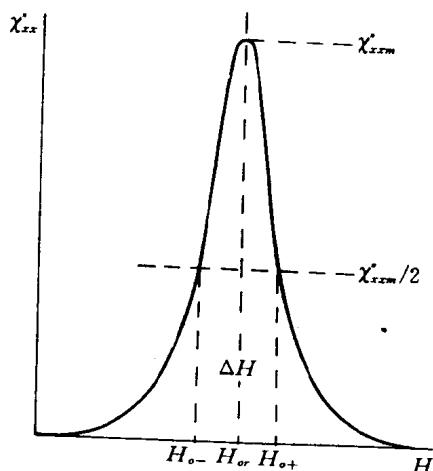


图 1.1 铁氧体线宽

因为 $\alpha^2 \ll 1$, $1 + \alpha^2 \simeq 1$ 和 $\omega = \omega_0$, 由式(1.17c) 则有:

$$\chi''_{xx} \approx \frac{\omega_m}{2\omega\alpha} \quad (1.19)$$

由铁氧体线宽定义可导出:

$$\frac{\omega\alpha\omega_m(\omega_0'^2 + \omega^2)}{(\omega_0'^2 - \omega^2)^2 + 4\omega_0'^2\omega^2\alpha^2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\omega_m}{2\omega\alpha} \quad (1.20)$$

整理此式,可得满足 $\omega_0'^2$ 的方程为:

$$\omega_0'^4 - 2\omega^2\omega_0'^2 + \omega^4(1 - 4\alpha^2) = 0 \quad (1.21)$$

方程(1.21)的根为:

$$\omega_{0\pm}' = \omega(1 \pm 2\alpha)^{1/2} \simeq \omega \pm \omega\alpha \quad (1.22)$$

因此
$$\omega\alpha = \frac{\omega_{0+}' - \omega_{0-}'}{2} \quad (1.23)$$

又因为
$$\Delta H = \frac{\omega_{0+}' - \omega_{0-}'}{\gamma} \quad (1.24)$$

故 α 与 ΔH 之间关系为:

$$\omega\alpha = \gamma\Delta H/2 \quad (1.25)$$

线宽是铁氧体的一个重要参数,它对铁氧体的磁损耗给出了有用的描述。

把式(1.17)和式(1.18)代入式(1.9)即得铁氧体存在损耗时的磁导率张量。前面给出的磁导率是关于无穷大铁氧体的,实际用的铁氧体都是有限尺寸,因此需考虑样品内存在的与外加磁场方向相反的退磁场。退磁场强度与样品形状有关。退磁场使铁氧体样品内的直流磁场与外加直流磁场不同,从而使磁化强度进动的谐振频率发生变化。由于退磁场的存在,外加直流磁场要大于铁氧体样品内的退磁场才能使其饱和磁化。在外加磁场等于样品中退磁场时,即认为样品实现饱和磁化。对固定磁场元件设计来说,掌握铁氧体材料的饱和磁化张量磁导率知识已经足够了,但对于移相器这类可变器件来说就不够了。这时,还必须知道去磁态和部分磁化状态时张量磁导率各元素的值。对于去磁态和部分磁化铁氧体磁导率的计算,文献[5]已详细讨论,这里不再赘述。

当外磁场为零时,铁氧体内存在的磁性晶体各向异性场会发生作用引起自然共振,因此会出现零场损耗。随着材料磁化到饱和,零场损耗随之消失。分析指出,下列是自然共振出现的频率范围:

$$\omega_A < \omega < \omega_A + \omega_m, \quad \omega_A = \gamma H_A$$

式中 H_A 是磁性晶体各向异性场。在此频率范围工作的铁氧体会有显著损耗, 这种损耗即为零场损耗。为避免这种损耗, 应当根据器件的工作频率, 正确地选择铁氧体材料的饱和磁化强度和 H_A 值, 以便使出现零场损耗的频率范围移出器件的工作频率范围。在微波频段要求

$$p + p_A < 1$$

式中

$$p = \omega_m / \omega, p_A = \omega_A / \omega = \gamma H_A / \omega$$

在毫米波频段, 由于频率很高, 即使选用 H_A 或饱和磁化强度较高或两者都高的铁氧体材料, 也不担心零场损耗的影响。有些器件, 例如毫米波谐振式隔离器, 要求很强的外偏磁场, 因此常使用高 H_A 的材料, 以使用高的 H_A 来部分地或全部地取代外加偏磁场而不会带来零场损耗的影响。

1.2 任意磁化方向的张量磁导率

在有些应用中会遇到任意磁化方向的情形, 故需用到任意磁化方向的张量磁导率。设所考虑坐标系为 (x, y, z) , 磁化方向在此坐标系中的方位角为 (θ, φ) 。选择坐标系 (x'', y'', z'') , 设磁化方向与此坐标系 l_z'' 方向重合, 如图 1.2 图所示。选择 l_x'' 在 (x, y, z) 坐标系的 xy 平面。让 (x, y, z) 坐标系绕 z 轴旋转 φ' 角与 x'' 轴重合, 得 (x', y', z') 坐标系。让 (x', y', z') 坐标系绕 x' 轴旋转 θ 角即得 (x'', y'', z'') 坐标系。这里有关系式

$$\varphi' = 2\pi - \varphi, \quad \varphi'' = \frac{\pi}{2} - \varphi' = \frac{\pi}{2} - (2\pi - \varphi) = \varphi - 3\pi/2$$

坐标变换关系为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi'' & -\sin\varphi'' & 0 \\ \sin\varphi'' & \cos\varphi'' & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \Phi \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (1.26)$$

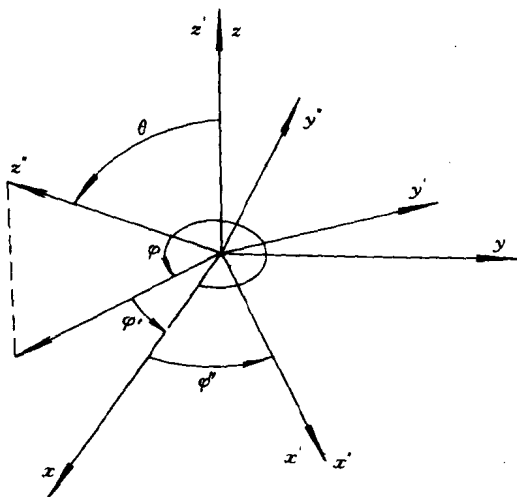


图 1.2 任意磁化方向的坐标变换关系

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} = \Theta \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} \quad (1.27)$$

$$\Phi^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\phi' & \sin\phi' & 0 \\ -\sin\phi' & \cos\phi' & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.28)$$

$$\Theta^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (1.29)$$

在 (x'', y'', z'') 坐标系中有:

$$\mathbf{b}'' = \hat{\mu}'' \cdot \mathbf{h}'' \quad (1.30)$$

式中

$$\hat{\mu}'' = \begin{bmatrix} \mu & -j\kappa & 0 \\ j\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{bmatrix} \quad (1.31)$$

因为

$$\mathbf{h}' = \Theta \mathbf{h}'', \quad \mathbf{h} = \Phi \mathbf{h}'$$