

国防科技图书出版基金

毫米波铁氧体器件 理论与技术 (第2版)

Millimeter Wave Ferrite
Devices Theory and Techniques
(Second Edition)



窦文斌 孙忠良 吴鸿超 胡淑欣 等著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

毫米波铁氧体器件 理论与技术(第2版)

Millimeter Wave Ferrite Devices
Theory and Techniques (Second Edition)

窦文斌 孙忠良 吴鸿超 胡淑欣 等著



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 / 窦文斌等著. —2 版.
—北京:国防工业出版社,2013.1
ISBN 978-7-118-07930-2

I. ①毫... II. ①窦... III. ①微波铁氧体器件 -
研究 IV. ①TN61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 150625 号

※

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 100048)
北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
新华书店经售

*

开本 710 × 960 1/16 印张 17½ 字数 307 千字
2013 年 1 月第 2 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 68.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717

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。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,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,原国防科工委于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. 在国防科学技术领域中,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,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备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,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,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,由总装备部国防工业出版社列选出版。

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,原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和武器装备建设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 第六届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 宋家树 蔡 镭 程洪彬

秘 书 长 程洪彬

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟

(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 邬江兴

刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁

李德毅 杨 伟 肖志力 吴有生

吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠

陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起

崔尔杰 韩祖南 傅惠民 魏炳波

第 2 版前言

本书第 1 版出版以来,毫米波铁氧体器件的研究又有新的进展,主要是计算电磁学的进步使得原来很难分析处理的铁氧体器件能够用电磁场数值分析方法给出精确的数值分析,例如原来对波导结环行器的严格处理仅限于圆柱形铁氧体柱,对工程中大量运用的部分高度三角形铁氧体柱结环行器就没有精确的分析处理,采用铁氧体球的结环行器更没有办法处理。同时,对微带结环行器,也都是沿用过去的近似处理。在这种情况下,环行器环行的物理机理和图像一直缺少基于严格电磁场处理的阐述和说明。本书第 2 版我们采用时域有限差分法、有限元法对不规则铁氧体加载结环行器进行数值分析,基于这些分析,说明了不同铁氧体结构环行器在环行时的场结构和物理图像以及对应的外特性,从而对结环行器的工作机理有彻底清楚的理解和阐述。

本书分为十一章,第一、二、三、七、八、九、十、十一章由窦文斌、孙忠良撰写,第四章由窦文斌、胡淑欣撰写,第五章由窦文斌、吴鸿超撰写,第六章由窦文斌、吴鸿超、杨非和孙忠良撰写。第七章和第十一章分别包括容昱和沈涛的一些工作。全文最后由窦文斌统稿。

第 2 版的文字处理得到黄瑞坤的许多帮助,在此向她深表谢意。

限于作者水平,本书难免存在缺点错误,恳请读者批评指正。

作 者

第 1 版前言

铁氧体器件理论与技术研究已有几十年的历史。20 世纪 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 Ferromagnetics”(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 20 世纪 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做了全面总结。

20 世纪 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,饶克谨教授,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

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	4
1.3 铁氧体材料用于毫米波频段的局限	7
参考文献	7
第二章 电磁波传播与电磁场方程	9
2.1 电磁波在无限大铁氧体媒质中的传播	9
2.2 铁氧体媒质中的电磁场方程	11
参考文献	14
第三章 波导 Y 结环行器	15
3.1 Y 结环行器的网络理论	15
3.2 H 面波导 Y 结环行器场理论	20
3.3 波导弯头对环行器性能的影响	35
3.4 高功率波导结环行器	39
3.5 W 波段结环行器——高阶模概念与应用	41
3.6 满高度铁氧体结环行器	43
3.7 本征模、结谐振模及其特性与应用	55
3.8 场图	63
3.9 E 面波导结环行器	65
3.10 波导结环行器的其他结构和理论处理	68
参考文献	69
第四章 不规则铁氧体波导结环行器的时域有限差分法分析	71
4.1 麦克斯韦方程的 FDTD 法推导	71
4.2 铁氧体中的 FDTD 处理	76
4.3 激励源的设置	80
4.4 吸收边界条件的设置	81

4.5 数值分析结果	87
4.6 结论	97
参考文献	97
第五章 不规则铁氧体波导结环行器的有限元分析	99
5.1 基于赫姆霍兹方程弱形式的有限元和模式展开结合方法的 基本原理	99
5.2 方法的验证	108
5.3 环行器结中的场结构	114
5.4 W 波段上环行器双模环行的实验验证	130
参考文献	133
第六章 其他 Y 结环行器	135
6.1 微带环行器	135
6.2 带线环行器	146
6.3 鳍线 Y 结环行器	148
6.4 非辐射介质波导环行器	149
参考文献	151
第七章 法拉第旋转器件	153
7.1 部分填充纵向磁化铁氧体的不规则波导	153
7.2 准光环行器和隔离器	161
7.3 小结	181
参考文献	181
第八章 分布式非互易器件	183
8.1 耦合模理论	183
8.2 分布式非互易结构的网络理论	189
8.3 分布式非互易器件的实现	192
参考文献	197
第九章 铁氧体加载传输线	199
9.1 模式—S 矩阵法	199
9.2 传输特性分析与本征函数确定	206
9.3 移相器和隔离器	215
9.4 滤波器	220
9.5 其他处理方法	223

参考文献	223
第十章 磁调器件	224
10.1 六角晶系铁氧体小球毫米波滤波器	224
10.2 LAF 铁氧体小球滤波器	227
10.3 YIG 薄膜调谐振荡器	230
参考文献	230
第十一章 天线与散射	231
11.1 接地各向异性板上点源的辐射	231
11.2 邻近各向异性板点源的辐射	240
11.3 铁氧体相扫天线	247
11.4 各向异性介质层对平面波的散射	248
11.5 各向异性介质柱对高斯束的散射	260
参考文献	265

Contents

Chapter 1 Gyromagnetic effect of Ferrite	1
1.1 Magnetic permeability tensor	1
1.2 Tensor magnetic permeability for arbitrary direction of magnetization	4
1.3 Limit of ferrite used in Millimeter waves bands	7
References	7
Chapter 2 Electromagnetic wave propagation and electromagnetic field equations	9
2.1 Electromagnetic wave propagation in infinity space	9
2.2 Electromagnetic field equations in ferrite materials	11
References	14
Chapter 3 Waveguide Y junction circulators	15
3.1 Network theory of Y junction circulators	15
3.2 Field theory of H plane waveguide Y junction circulators	20
3.3 Influence of waveguide bends to circulators performance	35
3.4 High power waveguide junction circulators	39
3.5 Junction circulators in W band – higher order modes concept and applications	41
3.6 Waveguide junction circulators of full – height ferrite post	43
3.7 Properties and applications of Eigen modes, junction resonance modes	55
3.8 Fields diagrams	63
3.9 Eplane waveguide junction circulators	65
3.10 Other structures of waveguide junction circulators and theoretic treatment	68
References	69

Chapter 4	FDTD analysis for irregular ferrite waveguide junction circulators	71
4.1	FDTD equations of Maxwell equations	71
4.2	Treatment of ferrite	76
4.3	Exciting sources	80
4.4	Absorbing boundary condition	81
4.5	Simulation results	87
4.6	Conclusion	97
	References	97
Chapter 5	Finite element method analysis of irregular ferrite waveguide junction circulators	99
5.1	Hybrid method of FEM based on weak form of Helmholtz equations and modes expansion	99
5.2	Validation of the method	108
5.3	Field structures in waveguide junction circulator	114
5.4	Experimental Validation of dual modes circulation of waveguide junction circulator in W band	130
	References	133
Chapter 6	Other Y junction circulators	135
6.1	Microstrip circulators	135
6.2	Strip line circulators	146
6.3	Finline Y junction circulators	148
6.4	Nonradiation dielectric waveguide circulators	149
	References	151
Chapter 7	Faraday rotation devices	153
7.1	Irregular waveguide partially filled with longitudinally magnetised ferrite	153
7.2	Quasi optical circulators and isolators	161
7.3	Conclusion	181
	References	181
Chapter 8	Distributed nonreciprocal devices	183
8.1	Coupled – Mode theory	183
8.2	Network theory of distributed nonreciprocal structures	189
8.3	Realization of distributed nonreciprocal devices	192
	References	197

Chapter 9	Transmission line loaded with ferrite	199
9.1	Modes – S matrix method	199
9.2	Analysis of transmission characteristics and determination of eigenfunctions	206
9.3	Phase shifters and isolators	215
9.4	Filter	220
9.5	Other treatments	223
	References	223
Chapter 10	Magnetic turning devices	224
10.1	Barium – Ferrite Tuned Filter used in millimeter waves	224
10.2	Lithium – Aluminum – Ferrite filter	227
10.3	YIG – Film tuned oscillator	230
	References	230
Chapter 11	Antenna and Scattering	231
11.1	Radiation from a dipole in the presence of a grounded anisotropic slab	231
11.2	Radiation from a dipole near a general anisotropic layer	240
11.3	Ferrite phase scan antenna	247
11.4	Scattering of plane wave by anisotropic layers	248
11.5	Scattering of Gaussian beam by anisotropic cylinder	260
	References	265

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 $\mathbf{m}$ 和射频磁场强度 $\mathbf{h}$,通过磁化率张量相联系:

$$\mathbf{m} = \mu_0 \boldsymbol{\chi} \cdot \mathbf{h} \quad (1.1)$$

式中:

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

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

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

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

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

式中: γ 为旋磁比常数,其值为 $2.21 \times 10^5 \text{ rad}/(\text{A}/\text{m})$; 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 $\boldsymbol{\mu}$ 因为

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

或

$$\mathbf{b} = \mu_0 \boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{h} \quad (1.8)$$

式中:

$$\boldsymbol{\mu} = \mathbf{I} + \boldsymbol{\chi} \quad (1.9)$$

或

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

式(1.9)中 $\mathbf{I}$ 为单位矩阵,即外加磁场在 z 方向且饱和磁化时有

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

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

磁导率张量 $\boldsymbol{\mu}$ 是磁感应强度 $\mathbf{b}$ 和磁场强度 $\mathbf{h}$ 关系的表述。 μ 、 κ 分别为磁导率张量 $\boldsymbol{\mu}$ 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

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

如果恒定磁场在 x 方向,则

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

式(1.10),式(1.13)和式(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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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）。

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

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

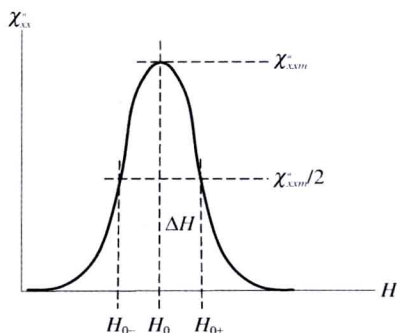


图 1.1 铁氧体线宽

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

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

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。