

微波铁氧体 新技术与应用

New Technique of Microwave
Ferrite and Application

■ 魏克珠 蒋仁培 李士根 编著



國防工業出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

微波铁氧体新技术与应用

New Technique of Microwave Ferrite and Application

魏克珠 蒋仁培 李士根 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

微波铁氧体新技术与应用 / 魏克珠, 蒋仁培, 李士根
编著. —北京: 国防工业出版社, 2013. 1

ISBN 978 - 7 - 118 - 08146 - 6

I ①微... II. ①魏 .. ②蒋... ③李 .. III. ①微波铁氧体器件 IV. ①TN61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 299067 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 插页 1 印张 22 $\frac{1}{4}$ 字数 405 千字

2013 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 126.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

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

前 言

微波铁氧体技术及其应用,从 20 世纪 60 年代初起步至今已有半个世纪历程,经历了初级阶段—发展阶段—成熟阶段,是新的理论、新的方法、新器件不断发展和创新的过程。本书用新的理念——微波铁氧体的张量磁导率及其可控特性,推出非互易方程。藉此作为基本理论和观点,对各种微波铁氧体器件的基本特性作了深入研究,以高频电磁场结构仿真软件(HFSS)为设计平台,设计并推动了多种铁氧体器件的发展,如各种 Y 型结环行器、变场调控器件和双模铁氧体器件,其非互易性理论和调控器件的设计和计算方法,给力器件的深化研究。

现代雷达、通信和电子对抗技术的发展,促进了铁氧体恒场器件(环行器、隔离器)和变场器件(开关、移相器和变极化器)应用和发展,提高了铁氧体器件的高功率、小型化、小损耗、低互调、宽频带、温度稳定性、超(高/低)频和快速调控等优异性能。

本书是根据上述新的设计原理和理论、新的设计手段和方法写成的。全书共 5 编 19 章:第 1 章至第 6 章由蒋仁培编写,论述了微波铁氧体材料的旋磁性——张量磁导率的基本原理,推出了与其相关的非互易性方程,推广其应用于开关和移相类变场器件的积分方程及计算方法,仿真设计方法定量地描述了器件的性能,其结果和理论相辅相成;第 7 章至第 19 章内容由魏克珠、李士根编写,重点描述了变极化器、移相器和双模器件的设计和应用。本书对从事微波铁氧体器件的设计者,促进器件的深入研究和推广应用颇有参考价值。

本书初稿经由总装备部国防科技图书出版基金评审委员会及国防工业出版社王华编审等审阅,提出了许多修改意见。中国电子学会应用磁学分会副主任委员王会宗研究员、中国科学院物理所国家磁学重点实验室赵见高研究员、南京金宁无线电器材厂(898 厂)顾瑞家高工、《现代雷达》编辑部杨慰民主任对初稿评审给予热情鼓励和支持。在定稿过程中,又得到了电子集团公司南京电子技

术研究所研究员宋淑平、徐茂忠的大力支持;潘健副总工程师、刘博高工、邢进高工、冯祖伟高工、刘传武博士、游培寒博士、王广顺所长、葛亦工总经理、刘洋、魏海涛、梁可可、魏劲松、郑建春等工程师参与书中“铁氧体电控全极化技术”专题研究设计与应用,提供了 L、S 波段等极化雷达抗干扰以及卫星通信自适应极化新应用。唐倩、钱莉娜、魏红春、刘玉杰、李子琦、李叶莉、胡岚、范兵、杨秋莉等对本书打印与绘图等做了大量工作。在此一并表示衷心感谢。

限于作者知识水平,书中难免有错误或不妥之处,敬请读者批评指正。

作者

2011年8月20日

目 录

第 1 编 基本理论

Part 1 Basic Theory

第 1 章 旋磁性	1	Chapter 1 Gyro-magnetic Property ...	1
1.1 磁矩进动方程	1	1.1 Magneto-moment precessional motion equation	1
1.2 阻尼进动	4	1.2 damping precession	4
1.3 铁磁共振频率	5	1.3 Frequency of ferromagnetic resonance	5
1.4 形状各向异性对张量 磁导率的影响	7	1.4 Specimen shape anisotropy effect on permeability tensor	7
1.5 张量磁导率的归一化 表示式	7	1.5 Normal expression of permeability tensor	7
1.6 本征态磁导率	12	1.6 Eigen state permeability	12
1.7 去磁态磁导率	15	1.7 Demagnetized state permeability	15
1.8 部分磁化状态与零场 损耗	20	1.8 Partial magnetized state and zero field loss	20
1.9 非线性效应	22	1.9 Nonlinear effects	22
第 2 章 电磁波在旋磁介质中 的传播	28	Chapter 2 Electromagnetic Wave Propagation in Gyro-magnetic Medium	28
2.1 电磁波在旋磁介质中的 基本效应	28	2.1 Electromagnetic wave propagation in infinite ferrite	28
2.2 电磁波在铁氧体波导中 的传播	30	2.2 Electronic-magnetic wave propagation in ferrite waveguide	30
2.3 电磁波在双模铁氧体波导中 的传播	51	2.3 Electronic-magnetic wave propagation in dual-mode ferrite waveguide	51

2.4 电磁波在非互易结中的 散射	74
第1编参考文献	83

第2编 Y型结环行器

第3章 Y型结环行器的非互易 网络理论	85
3.1 散射矩阵与阻抗 矩阵	85
3.2 非互易结的耦合电路 方程	89
第4章 波导Y型结环行器	97
4.1 3mm 环行器的设计	97
4.2 宽带波导Y型结 环行器	100
4.3 开关环行器	102
4.4 高功率Y型波导结 环行器	103
第5章 带线环行器和微带 环行器	105
5.1 双Y型结带线环行器	105
5.2 宽带环行器	109
5.3 倍频程带线环行器	110
5.4 超宽带环行器设计	113
5.5 高场区带线环行器	120
5.6 高场区环行器的温度 稳定性	127
5.7 扁平结构的环行器	129
第2编参考文献	130

2.4 Electronic-magnetic wave scattering in non-reciprocal junction	74
Part 1 References	83

Part 2 Y-junction Circulator

Chapter 3 Non-reciprocal Network Theory of Y-junction Circulator	85
3.1 Scatting matrix and impedance matrix	85
3.2 Coupled electric circuit equation of non-reciprocal junction	89
Chapter 4 Waveguide Y-junction Circulator	97
4.1 3mm circulator design	97
4.2 Wide-band waveguide Y-junction circulator	100
4.3 Switching circulator	102
4.4 High-power Y-junction waveguide circulator	103
Chapter 5 Strip-line Circulator and Micro-strip-line Circulator	105
5.1 Double Y- junction strip-line circulator	105
5.2 Wide-band circulator	109
5.3 Twice- frequency range strip-line circulator	110
5.4 Ultra-wideband circulator	113
5.5 High-field strip-line circulator ...	120
5.6 Temperature-stability of high-field circulator	127
5.7 Thin-planar structure circulator ...	129
Part 2 References	130

第3编 铁氧体变极化
技术及应用

Part 3 Ferrite Variable Polarization
Technique and Application

第6章 雷达极化捷变技术	132	Chapter 6 Radar Variable Polarization agility Technique	132
6.1 极化球概念	132	6.1 Polarization poicare concept	132
6.2 铁氧体变极化器	134	6.2 Ferrite variable polarizer	134
6.3 铁氧体全极化器	139	6.3 Ferrite omin-polarizer polarizer	139
6.4 A- \odot 型全极化器的 仿真设计与计算	143	6.4 A- \odot type omin polarizer Simulation Design and Calculating	143
第7章 高功率铁氧体变极化 技术	148	Chapter 7 High Power Ferrite Polarization Technique	148
7.1 高功率双模变极化器	148	7.1 High powerdual mode variable polarizer	148
7.2 高功率铁氧体全极 化器	152	7.2 High power ferrite omin polarizer	152
第8章 高功率锁式变极 化器	167	Chapter 8 High Power Latching Variable Polarizer	167
8.1 高功率圆波导锁式 变极化器	167	8.1 High power circular waveguide with latching variable polarizer	167
8.2 高功率方波导锁式 变极化器	170	8.2 High power square with waveguide latching variable polarizer	170
8.3 高功率变极化双工器	171	8.3 High power variable polarization duplexor	171
8.4 双通道高功率 变极化器	174	8.4 Dual channel high power variable polarizer	174
8.5 双通道组合高功率 变极化器	176	8.5 Dual channal high power variable polarizer	176
8.6 双通道高功率快速 变极化器	178	8.6 Dual channel high power fast variable polarizer	178

第 9 章 低功率铁氧体变极化技术	180
9.1 低功率锁式变极化器	180
9.2 双模宽带铁氧体变极化器及应用	182
9.3 铁氧体毫米波圆波导变极化器	184
9.4 铁氧体毫米波方波导变极化器	187
第 3 编参考文献	188

第 4 编 铁氧体移相器技术

第 10 章 微波铁氧体多极化移相器	190
10.1 纵场多极化移相器	190
10.2 横场多极化移相器	207
第 11 章 双模互易移相器	211
11.1 双模互易锁式铁氧体移相器	211
11.2 高精度的旋转场移相器	226
11.3 高功率旋转场双工移相器	235

Chapter 9 Low Power Ferrite Variable Polarization Teechnique	180
9.1 Low power latching variable polarizer	180
9.2 Dual mode broad band ferrite variable polarizer and it's application	182
9.3 Circular waveguide ferrite variable polarizer in millimeter-wave	184
9.4 Ferrite millimeter-wave square waveguide variable polarizer	187
Part 3 References	188

Part 4 Ferrite Phase Shifter Technique

Chapter 10 Microwave Ferrite Multi-Polarization Phase Shifter	190
10.1 Longitudinally multi-polarization phase shifter	190
10.2 Transverse field multi-polarization phase shifter	207
Chapter 11 Dual-Mode Reciprocal Phase-Shifter	211
11.1 Dual mode Reciprocal Ferrite Phase-shifter	211
11.2 Accurate rotary-field ferrite phase shifters	226
11.3 High power rotary field duplexing phase shifter	235

11.4 双工铁氧体互易移相器	242	11.4 Duplexing ferrite reciprocal phase shifter	242
第 12 章 双模变极化移相器	246	Chapter 12 Dual Mode Variable Polarization Phase Shifter ...	246
12.1 基本结构及应用	246	12.1 Basic structure and application	246
12.2 双模变极化移相器种类及结构	247	12.2 Dual mode variable polarization phase shifter class and structure	247
12.3 相控阵天线的极化控制组合类型	252	12.3 Phased array antenna polarization controlling combination	252
12.4 相控阵铁氧体移相极化器组件	256	12.4 Phased array ferrite phase shifter variable polarization combination	256
第 4 编参考文献	259	Part 4 References	259
第 5 编 铁氧体其他器件及应用		Part 5 Ferrite Other Device and Application	
第 13 章 双模调制器	262	Chapter 13 Dual Mode Modulator ...	262
13.1 旋转场调制器	262	13.1 Rotary field modulator	262
13.2 双模 $0/\pi$ 调制器	267	13.2 Dual mode $0/\pi$ modulator	267
13.3 单边带调制器	270	13.3 Single side band modulator	270
13.4 法拉第旋转式调制器 ...	272	13.4 Farady Rotary modulator	272
13.5 高功率调制器及应用 ...	273	13.5 High power modulator and application	273
第 14 章 高功率铁氧体开关	274	Chapter 14 High Power Ferrite Switches	274
14.1 铁氧体开关基本原理	274	14.1 Ferrite switches basic principle	274
14.2 高功率圆波导纵向磁化开关	275	14.2 High power circular waveguide longitudinally magnetic switches	275

14.3	高功率双模快速 开关	276	14.3	High power dual mode fast switches	276
14.4	高功率圆波导铁氧体 快速开关	279	14.4	High power circular waveguide Ferrite fast switches	279
14.5	法拉第旋转高功率 铁氧体开关	280	14.5	Faraday rotary high power ferrite switches	280
14.6	快速极化开关电路 原理	283	14.6	Fast polarization switches current- path principle analysis	283
14.7	高功率快速控制电源 设计及应用	285	14.7	High power fast control source design and application	285
第 15 章	双模铁氧体旋转场 器件	288	Chapter 15	Dual Mode Ferrite Rotary Flieid Device	288
15.1	双模铁氧体旋转线 极化器	288	15.1	Dual mode ferrite rotary linear polarizer	288
15.2	旋转场多功能 变极化器	290	15.2	Rotary flieid multi-function variable polarizer	290
15.3	隐蔽式圆锥扫描	292	15.3	Conceal scan-round	292
15.4	雷达目标信号模拟器	292	15.4	Radar target signal analogue	292
第 16 章	连续波高功率环行器 设计及应用	295	Chapter 16	Continuously Wave High Power Circulator Design and Application	295
16.1	L 波段 30kW 连续波 高功率环行器设计	295	16.1	L-band 30kW continuously wave high power circulator design	295
16.2	L 波段 100kW 连续波 高功率环行器设计	299	16.2	L-band 100kW continuously wave high power circulator design	299
16.3	高功率带线环行器 设计	300	16.3	High power strip line circulator design	300
第 17 章	铁氧体电控(非电控) 微带天线技术	308	Chapter 17	Ferrite Electrical Contro- lling Mirostrip Antenna Technique	308
17.1	非磁化铁氧体圆片微带 天线设计	308	17.1	Non-magnetic ferrite circular patch mirostrip antenna design	308

17.2	电控微带天线技术 特性	311	17.2	Electrical controlling microstrip antenna technique behavior	311
17.3	磁化铁氧体基片上的 微带天线雷达截面	315	17.3	Magnetic ferrite plate microstrip antenna radar rcs	315
17.4	电控铁氧体微带天线 基板材料和计算	318	17.4	Electrical controlling microstrip antenna plate material and calculate	318
第 18 章	MnZn 铁氧体/有机 高分子磁性微带天线 技术	320	Chapter 18	Mnzn Ferrite/organic Magnet Microstrip Antenna Technique	320
18.1	MnZn 铁氧体/有机 高分子微带天线 结构和种类	320	18.1	Mnzn ferrite/organic magnet microstrip structure and class	320
18.2	MnZn 铁氧体/有机 高分子微带天线 基板设计	321	18.2	Mnzn ferrite/organic magnet microstrip antenna plate design	321
第 19 章	铁氧体电控极化阵列 单元设计及应用	327	Chapter 19	Ferrite Electrical Controlling Polarization Array Element Antenna Design and Application	327
19.1	铁氧体全极化阵列 单元设计	327	19.1	Ferrite all polarization array antenna element design	327
19.2	集成铁氧体移相器扫描 微带天线阵列	331	19.2	Scanned microstrip array using simple integrated ferrite phase shifter	331
19.3	开关铁氧体微带阵列 天线辐射特性	334	19.3	Switching ferrite microstrip array antenna radiation behavior	334
19.4	铁氧体充填矩波导裂缝 天线阵列	335	19.4	Ferrite filled rectangular waveguide slot antenna array ...	335
第 5 编	参考文献	337	Part 5	References	337

第 1 编 基本理论

第 1 章 旋磁性

1.1 磁矩进动方程

在高频磁场 h 的作用下,饱和磁化铁氧体中磁化矩 M 围绕磁化场 H_0 (平行 z 轴) 作进动。铁氧体的磁矩主要来源于电子自旋磁矩,所以用单电子进动模型(图 1.1-1)来描述铁氧体磁矩进动是比较恰当的,只要铁氧体中自旋电子群保持了一致进动状态,就可以把它看作单个磁矩的进动,其进动方程为

$$\frac{dM}{dt} = -\gamma(M \times H_0) + T_D \quad (1.1-1)$$

式中:磁化强度 M 、磁场强度 H 包含了直流成分 M_0 、 H_0 和 高频成分 m 及 h , 即 $M = M_0 i_z + m_{xy} e^{j\omega t}$; $H = H_0 i_z + h_{xy} e^{j\omega t}$, 其中 ω 为激励磁场(角)频率;

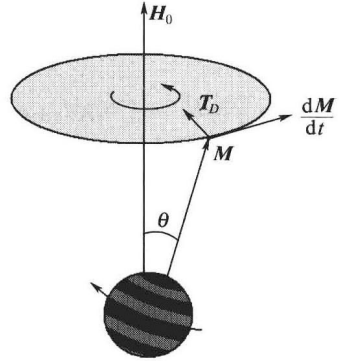


图 1.1-1 磁矩进动模型

γ 为旋磁比, $\gamma = ge/2mc$, ($\gamma = 2.21 \times 10^5 \text{ rad/s} \cdot \text{A/m}$), 其中 e/m 为电子电荷与电子净质量比值, c 为光速 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$, g 为 Landé 因子, 对单个电子自旋, $g=2$, 对轨道磁矩 $g=1$, 在铁氧体材料中, 测出 $g \approx 2$, 故铁氧体材料的磁性基本上来源于电子自旋磁矩。进动方程(1.1-1)的左端视为磁矩随时间变化, 右端 ($M \times H_0$) 视为力矩作用, 它的方向正是进动轨迹的切向。如果没有阻尼项 ($T_D=0$), 把 M, H 量代入进动方程(1.1-1)后, 求得

$$m_x = \chi h_x - j\kappa h_y, \quad m_y = j\kappa h_x + \chi h_y, \quad m_z = 0 \quad (1.1-2)$$

式中: χ 和 $j\kappa$ 分别看做磁化率和耦合磁化率, 式(1.1-2)可简化成

$$m = \chi h \quad (1.1-3a)$$

式中: χ 为张量磁化率, 可以写成矩阵形式:

$$\chi = \begin{bmatrix} \chi & -j\kappa & 0 \\ j\kappa & \chi & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.1-3b)$$

1.1-1 张量磁导率

在电动力学问题中, \mathbf{b} 和 \mathbf{h} 是两个磁学物理量, 其相互关系在 SI 单位制中表示成: $\mathbf{b} = \mu_0 \boldsymbol{\mu} \mathbf{h}$, $\boldsymbol{\mu} = \mathbf{I} + \boldsymbol{\chi}$, 其中 $\boldsymbol{\mu}$ 称为张量磁导率:

$$\boldsymbol{\mu} = \begin{bmatrix} \mu & -j\kappa & 0 \\ j\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.1-4a)$$

$\boldsymbol{\mu}$ 的对角分量 μ 和非对角分量 κ 分别为

$$\mu = 1 + \frac{\omega_0 \omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad \kappa = \frac{\omega_m \omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (1.1-4b)$$

式中: $\omega_0 = \gamma H_0$; $\omega_m = \gamma M_0$; ω 为工作频率。

当 $\omega_0 \rightarrow \omega$ 时, 无耗条件下 μ, κ 无限, 表示发生铁磁共振, 铁磁共振频率 $\omega_0 = \omega$ 。

张量磁导率充分展示了磁化铁氧体在高频场作用下呈现旋磁性, 这是旋磁材料基本的微波特性, 它有四个方面引人注意: 第一, x 方向的磁场 h_x , 感应出 y 方向的 $b_y = j\kappa$; 同样 y 方向的磁场 h_y , 感应出 x 方向的 $b_x = -j\kappa$; $\pm j$ 表示相位之间有 $\pm 90^\circ$ 的差异, 所以 \mathbf{b} 为椭圆极化矢, 这是磁矩进动现象导致的。第二, 张量磁导率是反对称张量 $\mu_{xy} = -\mu_{yx}$, 这导致微波在铁氧体介质中传播具有非互易性和各向异性。第三, 分量 μ, κ 具有磁控可调性, 这是磁控微波铁氧体器件的重要特性。第四, 微波铁氧体的铁磁共振性质。当 $\omega_0 = \omega$ 时, 即进动频率和电场频率 ω 相等时, 产生铁磁共振, μ 和 κ 的虚部出现峰值, 象征有耗材料出现铁磁共振损耗(图 1.1-2、图 1.1-3)。

从 μ, κ 及磁化场 ω_0/ω 曲线, 可以见到三个工作区: 低场区, 当 $\omega_0 \ll \omega$ 时, 即磁化场远离共振场($\omega_0/\omega = 1$), 这时 μ' 和 κ' 随磁化变化平坦, μ'' 和 κ'' 不大, 表示材料损耗小。共振区, 当 $\omega_0/\omega \approx 1.0$ 时, μ'', κ'' , 可现峰值。 α 为阻尼系数, 在 1.2 节中将有描述, 这里设置 $\alpha = 0.05$ 偏大, 目的是把铁磁共振曲线宽度拉宽。高场区: 当 $\omega_0/\omega > 1.2$ 时, σ 越大, 材料损耗越小, 可以认为 $\sigma > 1.5$ 时, 材料足够地饱和和磁化, 进入低损耗, 器件的损耗与低场工作区损耗可以相比拟, 甚至还小。