



国防科技图书出版基金

微波铁氧体器件 与变极化应用

Microwave Ferrite Device and
Variable Polarization Application

■ 魏克珠 潘健 刘博 刘传武 编著
李士根 审



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

微波铁氧体器件与变极化应用

Microwave Ferrite Device and Variable Polarization Application

魏克珠 潘健 刘博 刘传武 编著
李士根 审

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

微波铁氧体器件与变极化应用/魏克珠等编著. —
北京:国防工业出版社, 2017. 7
ISBN 978-7-118-11317-4

I. ①微… II. ①魏… III. ①微波铁氧体—研究
IV. ①TM277

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 150027 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)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 印张 32 $\frac{3}{4}$ 字数 658 千字

2017 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 158.00 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

本书由中央军委装备发展部国防科技图书出版基金资助出版。

为了促进国防科技和武器装备发展,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。这是一项具有深远意义的创举。

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中央军委装备发展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,由中央军委装备发展部国防工业出版社出版发行。

国防科技和武器装备发展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。开展好评审工作,使有限的基金发挥出巨大的效能,需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,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 第七届评审委员会组成人员

主 任 委 员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	赵伯桥	
秘 书 长	赵伯桥			
副 秘 书 长	邢海鹰	谢晓阳		
委 员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨 伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆 军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

前 言

微波铁氧体材料与器件发展至今已半个多世纪了,这种基础理论较强的专业技术得到了循序渐进的发展。在这一时期中,科研工作者们对各种微波铁氧体器件的基本特性作了深入的研究,研发出一系列独特的新器件。1970—1984 年间,成功研发设计 P 波段中宽带高功率 Y 型三端环行器,S、C、X 波段双模变极化高功率四端口环行器、双模变极化器,C、X 波段双模旋转场调制器等。这些器件成功应用在大 P 波段相控阵雷达、舰载精密测量雷达及靶场车载精密测量雷达等。这些器件在《微波铁氧体理论与技术》一书均有介绍。随着现代雷达、通信、电子侦察和电子对抗技术的迅速发展和应用,1985—1995 年间,研发出 S、C 波段双模高功率快速变极化转换开关,C 波段双模圆极化移相器,毫米波高低功率变极化器等,并成功应用于靶场相控阵天线单元系统中。这些科研成果被编入《微波铁氧体新器件》一书。

随着国家综合国力不断增强,各波段相控阵雷达天线技术迅速发展,并促进了铁氧体移相器及各波段微波铁氧体材料的研发,极大地提高了雷达实战能力,扩大军用、民用雷达及移动通信市场应用。为此,1995—2008 年间科研工作者又成功研发出全波段(L、S、X 波段)宽频带组合变极化器,S 波段高功率高精度旋转场双工器、L 波段双模高功率铁氧体全极化器(窄带)等。这些器件成功应用于单脉冲低轨卫星侦察雷达及 L 波段防控警戒雷达设备中,并在《微波铁氧体新技术与应用》一书中做了介绍。

2008 年至今,为满足雷达全极化域技术应用研究及应用需要,人们在原来设计器件基础上,成功研发了 P、L 及 S 波段宽频带高(低)功率全极化域变极化器,在雷达抗干扰取得应用效果。在此期间,为实现脉间极化捷变,将极化转换时间由原来的 3ms 提升到微秒量级,使得全波段 L、S、C、X、Ku 及 Ka 快速锁式全极化域变极化器。这一技术上的突破,将为现代极化雷达抗干扰和目标识别能力开辟有效技术途径,同时,为增强相控阵雷达天线多功能新应用特性,设计了 C、X 波段变极化移相器组件,C、X 波段双模极化不灵敏移相器,S、X 波段铁氧体微带变极化移相器组件及 X 波段铁氧体快速锁式全极化天线单元等。这些器件在当代微波技术发展及应用中是引人注目的,其非互易特性(互易)别具一格,目前仍处于无法被替代的地位。

本书根据新原理、新结构、新发展及新应用编写而成,全书共 4 编 19 章,第 1

章~第5章、第15章~第19章由魏克珠、刘传武编写;第6章~第14章由潘健、刘博编写。另外,刘传武博士对全书各编章节内容进行了安排与校正。全书由知名微波磁学专家李士根研究员进行审核,并提出了细致的修改意见。

本书第1章~第5章主要论述了微波铁氧体材料参数特性、任意磁化的张量磁导率各坐标表示式,以及耦合传输线在圆、方波导中的传输特性,为设计各种双模器件提供了较系统的理论依据。第6章~第10章主要论述了P、L、S、X波段高(低)功率全极化域变极化器的新型微波结构及电性能。这些新器件既能加装于现有雷达系统,又能用于新雷达的设计,对提高雷达实战能力有重要意义。第11章~第14章主要叙述了铁氧体极化不灵敏移相器、变极化移相器组件、铁氧体微带(带线)变极化移相器组件等。这些新型变极化移相器将为地面制导相控阵雷达、机载相控阵雷达等新领域应用增强抗干扰的潜在新功能。第15章~第19章主要介绍了高功率变极化环行器、连续波高功率环行器、带线高功率环行器、高功率快速开关以及磁性微带天线阵列、铁氧体电控全极化天线单元等。这些器件在电子设备系统中有着重要新应用。

本书获得国防科技图书出版基金资助,这离不开国防工业出版社编辑给予的建议与意见。中国科学院物理所国家磁学重点实验室赵见高研究员、南京理工大学电光学院温俊鼎教授、原《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;黄诚总工、乔治军所长、唐亮所长、胡瑜所长、刘恒春总工、孙靖总工、孙桂领总工、石翌处长、史立新高工、游培寒博士、王锋博士、葛贤坤博士、钟文超工程师等对于书中相关研究成果给予了极大支持和帮助;同时,蒋仁培研究员、徐茂忠研究员、原电子学会应用磁学分会副主任委员王会宗研究员、张道炽教授、徐章遂教授、林展如教授、林云教授、王广顺所长、葛亦工总经理、鲍飞兵总经理、邵峰所长、冯祖伟高工、苏丽萍高工、王恒玉总经理、吕品副总经理、魏劲松、魏海涛、魏昆、梁可可、赵未平、郑振中、李银传、刘有序、郑建春、武永、杨东、王冬、刘洋等参与课题研究;魏榕对于本书初稿拟定及图文公式、格式等做出大量工作,徐厚恋、许宗敏参与初稿、定稿中部分章节图文公式编辑,魏红春承担书中部分图片的扫描工作,在此一并表示衷心感谢。

由于本书内容涉及面广,有些问题须待进一步深入研究。加之作者水平有限,书中疏漏及不当之处在所难免,敬请同行业读者批评指正。

编者

2017.1

目 录

第1编 基本理论

第1章 微波铁氧体材料及张量

磁导率	1
1.1 微波铁氧体材料特性	1
1.2 微波铁氧体材料的参数	2
1.3 微波铁氧体材料	3
1.4 各铁氧体材料化学分子式及参数	13
1.5 铁氧体材料制备及性能参数测试	14
1.6 微波铁氧体材料应用	16
1.7 张量磁导率普遍表示式	25
1.8 任意磁化方向的张量磁导率	26
1.9 各种坐标系中的张量磁导率	28

第2章 广义坐标的耦合传输线

方程	40
2.1 麦克斯韦方程和耦合传输线方程	40
2.2 横向磁化的耦合传输线方程组	42
2.3 纵向磁化的耦合传输线方程组	44

Part 1 Basic Theory

Chapter 1 Microwave Ferrite Material and Tensor Permeability

1.1 Characteristics of microwave ferrite material	1
1.2 Parameters of microwave ferrite material	2
1.3 Microwave ferrite materials	3
1.4 Molecular formulae and parameters of several ferrite materials	13
1.5 Preparation and parameter testing of ferrite materials	14
1.6 Applications of microwave ferrite materials	16
1.7 Common expression of tensor permeability	25
1.8 Tensor permeability magnetized in arbitrary direction	26
1.9 Tensor permeability in various coordinates	28

Chapter 2 Coupled Transmission Lines Equations in Generalized Coordinates

2.1 Maxwell's equations and coupled transmission equations	40
2.2 Transverse magnetized coupled transmission equations	42
2.3 Longitudinal magnetized coupled transmission equations	44

第3章 铁氧体圆波导中的双模传播	47
3.1 圆波导的耦合传输线方程	47
3.2 四磁极磁化双模简正波	48
3.3 四磁极磁化双模耦合波	51
3.4 全充满横向磁化铁氧体圆波导	55
3.5 四磁极切向磁化和法向磁化	59
3.6 横向均匀磁化的互易相移	61
3.7 闭合磁化的非互易相移	65
3.8 纵向磁化与法拉第旋转	66
3.9 变极化效应和法拉第旋转效应比较	69

第4章 铁氧体方波导中的双模传播	71
4.1 方波导的耦合传输线方程	71
4.2 四磁极磁化双模耦合波	72
4.3 四磁极磁化双模简正波	75
4.4 部分充填横向磁化铁氧体方波导的耦合波理论	76
4.5 部分填充横向磁化铁氧体方波导	81

第5章 波导中磁化铁氧体的基本传播特性分析	84
5.1 微扰法	84
5.2 能量等效法	86

Chapter 3 Dual-mode Transmission in Ferrite Circular Waveguide	47
3.1 Coupled transmission lines equation of circular waveguide	47
3.2 Quadrupole magnetized dual - mode normal mode	48
3.3 Quadrupole magnetized dual - mode coupled wave	51
3.4 Full - filled transverse magnetized ferrite circular waveguide	55
3.5 Quadrupole tangential magnetization and quadrupole normal magnetization	59
3.6 Reciprocal phase shift of transverse uniform magnetization	61
3.7 Non - reciprocal phase shift of closed magnetization	65
3.8 Longitudinal magnetization and Faraday rotation	66
3.9 Comparison between polarization variation effect and Faraday roation effect	69

Chapter 4 Dual-mode Transmission in Ferrite Square Waveguide	71
4.1 Coupled transmission lines equation of square waveguide	71
4.2 Quadrupole magnetized dual - mode coupled wave	72
4.3 Quadrupole magnetized dual - mode normal mode	75
4.4 Coupled wave theory of partially filled transverse magnetized ferrite square waveguide	76
4.5 Partially filled transverse magnetized ferrite square waveguide	81

Chapter 5 Transmission Characteristic Analysis of Magnetized Ferrite in Waveguide	84
5.1 Perturbation method	84
5.2 Energy equivalent method	86

5.3	有效磁导率和有效介电常数	88
5.4	用微扰法解矩形波导互易移相器	89
5.5	H 面非互易移相器的微扰公式	91
5.6	电磁波在旋磁介质中传播特性	92
5.7	电磁波在双模波导中的基本传播效应	96
5.8	贝塞尔函数积分公式和数值表	100
第 1 编参考文献		104

第 2 编 铁氧体变极化技术及应用

第 6 章	雷达变极化技术	105
6.1	极化基础知识	105
6.2	电磁波极化的基本理论 ...	107
6.3	椭圆极化波的几个参数 ...	110
第 7 章	微波铁氧体变极化技术发展及应用	113
7.1	单模双通道高功率变极化器	113
7.2	双模单通道高功率变极化器	120
第 8 章	高功率锁式变极化器	128
8.1	概述	128
8.2	高功率圆波导锁式变极化器	128

5.3	Effective permeability and effective dielectric constant	88
5.4	Analysis of rectangular waveguide reciprocal phase shifter using perturbation method	89
5.5	Perturbation formula of H - plane non - reciprocal phase shifter	91
5.6	Transmission characteristic of electromagnetic wave in gyromagnetic medium	92
5.7	Transmission characteristic of electromagnetic wave in dual - mode waveguide	96
5.8	Integral Equations of Bessel Functions and numerical table	100
References of Part 1		104

Part 2 Variable Polarization Technology of Ferrite and Application

Chapter 6	Variable Polarization Technology of Radar	105
6.1	Introduction of Polarization	105
6.2	Basic theory of electromagnetic wave polarization	107
6.3	Parameters of elliptical polarization wave	110
Chapter 7	Development and Application of Microwave Ferrite Variable Polarization Technology ...	113
7.1	Single - mode two - channel high - power variable polarizer	113
7.2	Dual - mode single - channel high - power variable polarizer	120
Chapter 8	High - power Latching Variable Polarizer	128
8.1	Introduction	128
8.2	High - power circular waveguide latching variable polarizer	128

8.3	高功率方波导锁式变极化器	133
8.4	双通道高功率快速变极化器	135
8.5	高功率变极化双工器	137

第9章 高功率铁氧体全极化器 ... 141

9.1	概述	141
9.2	极化球的概念	141
9.3	广义铁氧体变极化理论 ...	143
9.4	组合型铁氧体变极化器 ...	147
9.5	高功率铁氧体全极化器结构种类和工作原理分析	149
9.6	双模单通道全极化器工作原理及仿真分析	154
9.7	双模单通道铁氧体全极化器微波结构种类	163
9.8	双模宽带铁氧体全极化器	177

第10章 低功率铁氧体变极化技术

10.1	方波导变极化器	187
10.2	圆波导变极化器	191
10.3	互易变极化器	193
10.4	低功率锁式变极化器	195
10.5	宽带铁氧体变极化器及其应用	197
10.6	宽带变极化器新应用	202
10.7	铁氧体毫米波圆波导变极化器	204
10.8	铁氧体毫米波方波导变极化器	206

8.3	High - power square waveguide latching variable polarizer	133
8.4	Two - channel high - power rapid variable polarizer	135
8.5	High - power variable polarization duplexer	137

Chapter 9 High - power Ferrite Omni - polarizer

9.1	Introduction	141
9.2	Concept of polarization sphere	141
9.3	Theory of generalized ferrite variable polarization	143
9.4	Combined variable polarizer	147
9.5	Structure and operating principle of high - power ferrite omni - polarizer	149
9.6	Operating principle of dual - mode single - channel omni - polarizer and analysis of the scheme simulation	154
9.7	Microwave structure types of dual - mode single - channel ferrite omni - polarizer	163
9.8	Dual - mode broadband ferrite omni - polarizer	177

Chapter 10 Low - power Ferrite Variable Polarization Technology ... 187

10.1	Square waveguide variable polarizer	187
10.2	Circular waveguide variable polarizer	191
10.3	Reciprocal variable polarizer	193
10.4	Low - power latching variable polarizer	195
10.5	Broadband ferrite variable polarizer and its application	197
10.6	New application of broadband variable polarizer	202
10.7	Millimeter wave circular waveguide ferrite variable polarizer	204
10.8	Millimeter wave square waveguide ferrite variable polarizer	206

10.9 毫米波铁氧体快速(锁式)	
变极化器	210
10.10 铁氧体变极化技术在雷达	
中应用	213
第2编参考文献	216

第3编 铁氧体移相技术

第11章 铁氧体移相器概况和	
分类	217
11.1 概述	217
11.2 对移相器的要求	217
11.3 铁氧体移相器的分类	218
11.4 移相器基本概念	219
11.5 锁式圆极化移相器	221
11.6 非锁式圆极化移相器	227
11.7 互易圆极化移相器	229
11.8 高精度的旋转场移相器	230
11.9 高功率旋转场双工移	
相器	239
11.10 锁式铁氧体旋转场移	
相器	246
11.11 相控阵极化开关	250
11.12 矩形波导非互易移	
相器	254
11.13 铁氧体移相器在通信相	
控阵天线中新应用	261

第12章 双模铁氧体多极化移	
相器	269
12.1 纵场极化不灵敏移相器	269

10.9 Millimeter wave rapid (latching)	
ferrite variable polarizer	210
10.10 Application of ferrite variable	
polarization technology	
in radar	213
References of Part 2	216

Part 3 Ferrite Phase Shift Technique

Chapter 11 General Profile and Classification	
of Ferrite Phase Shifter ...	217
11.1 Introduction	217
11.2 Requirement of the phase shifter ...	217
11.3 Classification of ferrite	
phase shifter	218
11.4 Concepts and descriptions of	
phase shifters	219
11.5 Latching circular polarization	
phase shifter	221
11.6 Non - latching circular polarization	
phase shifter	227
11.7 Reciprocal circular polarization	
phase shifter	229
11.8 High - precision rotating field	
phase shifter	230
11.9 High - power rotating field duplex	
phase shifter	239
11.10 Latching ferrite rotating field	
phase shifter	246
11.11 Phase - array polarization	
switch	250
11.12 Rectangular waveguide non - reciprocal	
phase shifter	254
11.13 Application of ferrite phase	
shifter in communication phased	
array antenna	261

Chapter 12 Dual - mode Ferrite Multi - po-	
larization Phase Shifter ...	269
12.1 Longitudinal polarization insensitive	
phase shifter	269

12.2	横场式多极化移相器	280	12.2	Transverse field multi - polarization phase shifter	280
12.3	双模移相器的温度稳定性	285	12.3	Temperature stability of dual - mode phase shifter	285
12.4	双模移相器的开关时间和 开关能量	291	12.4	Switching time and energy of dual - mode phase shifter	291
12.5	双模器件的阻抗变换器 设计	296	12.5	Impedance transformer design of dual - mode devices	296
第 13 章 铁氧体移相变极化器			Chapter 13 Components of Ferrite Phase Shift Variable Polarizer ...		
	组件	307	13.1	Introduction of phase shift polarizer components	307
13.1	移相极化组件概述	307	13.2	Variety and structure of dual - mode phase shift polarizer	307
13.2	双模变极化移相器种类及 结构	307	13.3	Polarization control of phased - array antenna	313
13.3	相控阵天线的极化控制 ...	313	13.4	Ferrite phase shifter control circuit	326
13.4	铁氧体移相器控制电路 ...	326	13.5	Application example of ferrite phase shifter	331
13.5	铁氧体移相器应用举例 ...	331	13.6	Application of variable polarization phased - array antenna	334
13.6	变极化相控阵天线应用 研究	334	Chapter 14 Ferrite Microstrip Components and Application		
第 14 章 铁氧体微带组件及 应用			14.1	Structure of various ferrite microstrip phase shifters	341
		341	14.2	Ferrite microstrip omni - polarizer simulation	347
14.1	铁氧体微带移相器种类 及结构	341	14.3	Design of lowcost ferrite phase shifter based on microstrip line and its applica- tion in phased - array antenna ...	370
14.2	铁氧体微带全极化器 仿真	347	References of Part 3		
14.3	微带线的低成本铁氧体移 相器设计	370	Part 4 Other Ferrite Devices and Magnetic Microstrip Antenna Technique		
第 3 编参考文献			Chapter 15 High - power Circulator ...		
第 4 编 铁氧体其他器件与 微带磁性天线技术			15.1	Dual - mode variable polarization circulator	377
第 15 章 高功率环行器			Chapter 15 High - power Circulator ...		
15.1	双模变极化环行器	377	Chapter 15 High - power Circulator ...		

15.2	双模高功率变极化 环行器	381	15.2	Dual - mode high - power variable polarization circulator	381
15.3	变极化隔离器	385	15.3	Variable polarization isolator	385
15.4	连续波高功率环行器	386	15.4	Continuous wave high - power circulator	386
15.5	高功率带线环行器设计 ...	394	15.5	Design of high - power strip line circulator	394
第 16 章 磁控极化调控技术 及应用			Chapter 16 Magnetron Polarization Control Technique and Application		
16.1	极化调控技术的基本 原理	405	16.1	Basic principle of polarization control technique	405
16.2	双模调制器	410	16.2	Dual - mode modulator	410
16.3	高功率铁氧体开关	421	16.3	High - power ferrite switch	421
16.4	双模功率分配器	430	16.4	Dual - mode power divider	430
第 17 章 铁氧体电控天线技术 及应用			Chapter 17 Ferrite Electronic Control Antenna Technique and Application		
17.1	法拉第旋转型变极化 天线	441	17.1	Faraday rotation variable polarization antenna	441
17.2	铁氧体横向场变极化 天线	446	17.2	Ferrite transverse field variable polarization antenna	446
17.3	电控微带天线技术特性 ...	453	17.3	Technical characteristic of electronic control microstrip antenna	453
17.4	磁化铁氧体基片上的微带 天线的雷达散射截面	457	17.4	Radar cross section(RCS) of microstrip antenna on magnetized ferrite baseplate	457
17.5	铁氧体基板上圆贴片天线 的设计	460	17.5	Design of circular patch antenna on ferrite base plate	460
17.6	使用铁氧体移相器的可控 线性偶极子天线	470	17.6	Controllable linear dipole antenna using ferrite phase shifter	470
第 18 章 铁氧体非电控微带天线 技术			Chapter 18 Ferrite Non - electrical Control Microstrip Antenna Technique		
18.1	非磁化铁氧体圆片微带 天线设计	475	18.1	Non - magnetized ferrite disc microstrip antenna design	475

18.2	有机高分子/MnZn 铁氧体 基板材料比较	477	18.2	Organic polymer/MnZn ferrite baseplate material comparison	477
18.3	甚低频铁氧体微带天线 单元设计	482	18.3	Very low frequency (VLF) ferrite microstrip antenna element design	482
第 19 章	有机高分子/聚四氟乙烯 基板微带阵列	485	Chapter 19	Organic Polymer/Polytetrafluoroethylene Baseplate Microstrip Array	485
19.1	Ku 波段平面微带天线阵 及工作原理	486	19.1	Ku waveband plane microstrip antenna array and its operating principle	486
19.2	聚四氟乙烯基板微带天线 阵性能	488	19.2	Performance of polytetrafluoroethylene baseplate microstrip antenna array	488
19.3	二茂铁有机磁	490	19.3	Ferrocene organic ferromagnet ...	490
19.4	X 波段低副瓣水平极化微带 阵列天线设计及应用	494	19.4	Design and application of X waveband low side-lobe horizontal polarization microstrip array antenna	494
第 4 编参考文献	497		References of Part 4	497	

第1编 基本理论

第1章 微波铁氧体材料及张量磁导率

1.1 微波铁氧体材料特性

铁氧体是由铁和其他一种或多种金属离子组成的具有铁磁性的复合氧化物,它是20世纪三四十年代发展起来的一种磁性材料。和金属磁性材料相比,铁氧体具有以下特点:有很高的电阻率,一般铁氧体的电阻率从 $10^2 \sim 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$;就其导电性而言,它又是属于半导体一类;在介电性方面,铁氧体又是一种具有介电性质的磁性材料,在超高频段,介电常数约 $8 \sim 16$,介电损耗正切 $10^{-4} \sim 10^{-3}$,在低频段,某些铁氧体的介电常数可为 $10^3 \sim 10^5$ 。

铁氧体的生产过程、外观及成品加工都类似于陶瓷材料,其制备过程如下:配料(按一定化学成分称出用量)→研磨(把配料混合,在球磨机上磨细)→造粒(研磨后的粉末成型)→预烧(在高温炉中加热成复合混合物)→粉碎(预烧后的复合混合物磨成粉末状)→成型(把预烧后的粉末在钢质压模成型)→烧结(在 $1000 \sim 1500^\circ\text{C}$ 的温度下烧结成品)→成品形状加工(根据用途加工成需要的工件形状)。

按照铁氧体的特性和用途,可以把铁氧体分成软磁、硬磁、旋磁、矩磁和压磁五类。所谓微波铁氧体一般是旋磁性的铁氧体,其应用频段通常从米波段到毫米波段,该铁氧体的磁化强度总是绕着磁场(包括外加磁场和介质本身的等效场),不停地进动。这种进动在高频电磁场的作用下就产生旋磁现象,即磁导率的张量特性。正是这种旋磁性,使在铁氧体中传播的电磁波产生极化面旋转(法拉第效应)以及电磁波能量被强烈吸收(铁磁共振)等现象,利用这种原理就可研制成各种固定磁场器件和变磁场器件。固定磁场器件是一种非互易器件,例如环行器和隔离器,它的传输方向从端口1到端口2到端口3再回到端口1。它的插入损耗很小,一般为 $0.2 \sim 0.3\text{dB}$,而反向传输损耗很大(即隔离度),一般为 $20 \sim 25\text{dB}$ 。这类器件的非互易性与其他器件不可替代的,广泛应用于雷达和通信领域。变磁场器件如电控移相器和变极化器等,在相控阵雷达和极化雷达中得到广泛应用。这类器件在某些场合下可用半导体器件替代。

1.2 微波铁氧体材料的参数

在上述讨论铁氧体的基本物理特性的内容中,已经涉及微波铁氧体的几个参数:

(1) 饱和磁化强度($4\pi M_s$):代表铁氧体单位体积的饱和磁化强度,对各种材料通常在 $135 \sim 5000 / \left(\frac{1}{4\pi} \text{kA/m} \right)$ 。

(2) 居里温度(T_c):表示铁氧体磁化强度为零时的温度,通常为 $100 \sim 600^\circ\text{C}$ 。

(3) 各向异性常数(K_1, K_2)及退磁因子(N)。

从器件的角度看,表征微波铁氧体特性的除上述几个参数外,还有表述磁特性的张量磁导率 $[\mu]$ 及其有关的共振线宽 ΔH ,自旋波线宽 ΔH_k ,表述电特性的复量介电常数 $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$ 。关于张量磁导率等将在 1.7 节详细讨论,这里只指出 ΔH 这个描述材料磁损耗的量。 ΔH 是由铁氧体内部机理决定的,一般说来它由三部分组成:

$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_A + \Delta H_p \quad (1.2-1)$$

式中: ΔH_1 为本征内禀线宽,是材料的基本参数,随材料的组成而显著变化。当不存在稀土离子时, ΔH_1 通常小到足以忽略不计,对某些稀土取代的 YIG, ΔH_1 从 10 变化到几百奥斯特。对某些尖晶石材料,例如 MnFe_2O_4 , ΔH_1 为 $10 \sim 100 / \left(\frac{1}{4\pi} \text{kA/m} \right)$ 。

ΔH_A 与 ΔH_p 是磁的或非磁的不均匀加宽效应,通常与各向异性常数 K_1 及材料空隙率成比例。几种多晶材料的 ΔH 与 ΔH_1 值如表 1.2-1 所列。

表 1.2-1 几种多晶材料的 ΔH 与 ΔH_1 值^①

成分	$M_s / \left(\frac{1}{4\pi} \text{kA/m} \right)$	$\Delta H / \left(\frac{1}{4\pi} \text{kA/m} \right)$	$\Delta H_1 / \left(\frac{1}{4\pi} \text{kA/m} \right)$
$\text{Y}_{2.7}\text{Dy}_{0.3}\text{Fe}_{4.6}\text{Al}_{0.4}\text{O}_{12}$	965	380	365
$\text{Y}_{2.88}\text{Dy}_{0.12}\text{Fe}_{4.6}\text{Al}_{0.4}\text{O}_{12}$	1120	160	145
$\text{Y}_{2.94}\text{Dy}_{0.06}\text{Fe}_{4.6}\text{Al}_{0.4}\text{O}_{12}$	1120	100	85
$\text{Y}_{2.10}\text{Gd}_{0.9}\text{Fe}_{5.0}\text{O}_{12}$	1250	70	50
$\text{Y}_{2.55}\text{Gd}_{0.45}\text{Fe}_{5.0}\text{O}_{12}$	1540	50	25
$\text{Y}_{3.0}\text{Fe}_{4.75}\text{Al}_{0.25}\text{O}_{12}$	1380	30	12
$0.58\text{MgO} \cdot 0.06\text{MnO} \cdot 0.36\text{Fe}_2\text{O}_3$	2060	510	18

由此可见,有些材料 ΔH 与 ΔH_1 差别不大,这对于某些器件,例如移相器的分

^① 蒋仁培,陈清河,等. 微波铁氧体工程原理(上册),1975。