



国防特色学术专著

National Defense Monograph



人工电磁结构及其在滤波器中的应用

童创明 主编

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书系统介绍了人工电磁结构及其在滤波器中的应用。全书共有 9 章。主要内容包括概论、一维介质型电磁晶体研究、二维介质型电磁晶体研究、蘑菇谐振器及其在电磁带隙滤波器中的应用、特殊地面缺陷结构及其在低通滤波器中的应用、SRR-DBDGS 及其在双频带阻滤波器中的应用、CSRR 及其在阶梯阻抗低通滤波器中的应用、CSRR 在双模贴片滤波器中的应用以及 CSRR CRLH 传输线及其在宽带滤波器中的应用。

本书是作者在总结近年来关于人工电磁结构及其应用的部分研究成果基础上编写而成的,可供国内同行参考。

图书在版编目(CIP)数据

人工电磁结构及其在滤波器中的应用/童创明主编. —西安:西北工业大学出版社,2011.11
ISBN 978-7-5612-3235-4

I. ①人… II. ①童… III. ①电磁场—介质—应用—微波滤波器—研究 IV. ①TN713

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 232622 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西宝石兰印务有限责任公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:7.25

字 数:170 千字

版 次:2011 年 11 月第 1 版 2011 年 11 月第 1 次印刷

定 价:20.00 元

前言

人工电磁结构是指电磁波在其中传播时具有特殊传导或者辐射特性的人工复合结构。从广义上说,人工电磁结构包括所有对电磁波的传播具有特定影响的人造材料或结构,比如电磁带隙结构(又称电磁晶体)、地面缺陷结构(DGS)以及复合左右手结构等。本书主要研究了几种人工电磁结构和这些结构中电磁波的传输特性以及基于这些结构的滤波器的设计方法、制作过程和应用背景。

本书共有 9 章。主要内容包括概论、一维介质型电磁晶体研究、二维介质型电磁晶体研究、蘑菇谐振器及其在电磁带隙滤波器中的应用、特殊地面缺陷结构及其在低通滤波器中的应用、开口环谐振器(SRR-DBDGS)加载地面缺陷结构及其在双频带阻滤波器中的应用、互补开口环谐振器(CSRR)及其在阶梯阻抗低通滤波器中的应用、互补开口环谐振器在双模贴片滤波器中的应用以及互补开口环谐振器复合左右手(CSRR CRLH)传输线及其在宽带滤波器中的应用等。具体情况如下:

第 1 章为概论。主要阐述了本书研究的背景及意义,人工电磁结构及其应用现状。另外,对本书的主要内容及章节安排进行了介绍。

第 2 章为一维介质型电磁晶体研究。介绍一维介质型电磁晶体的平面波展开法和周期矩量法求解模型;分析介电常数比、填充率等参数对普通一维介质型电磁晶体带隙的影响,研究一维介质型可调谐电磁晶体的带隙特性;在周期矩量法的本征方程求解中,介绍两种不同的搜索算法,并进行对比分析;介绍一维介质型电磁晶体的两个应用实例。

第 3 章为二维介质型电磁晶体研究。介绍二维介质型电磁晶体的平面波展开法和周期矩量法求解模型;推导不同类型电磁晶体的结构系数表达式,增强分析模型的通用性,设计一种具有完全带隙的复合晶胞电磁晶体结构。将等效介质理论引入周期矩量法求解模型中,实现计算简化。最后,介绍介质型电磁晶体的仿真模型,利用其分析电磁晶体的传输特性,并与数值方法的求解结果进行对比。

第 4 章为蘑菇谐振器及其在电磁带隙(EBG)滤波器中的应用。介绍了几种蘑菇谐振器的物理模型,并给出了相应的等效电路,研究了结构参数对蘑菇谐振器传输特性的影响。在此基础上,采用组合单元法设计了几种结构紧凑的宽阻带 EBG 滤波器。

第 5 章为特殊地面缺陷结构及其在低通滤波器中的应用。介绍了两种特殊 DGS 单元,并对 DGS 单元的传输特性进行了仿真分析和改进设计。在此基础上,构造了两种高性能低通滤波器。

第 6 章为 SRR-DBDGS 及其在双频带阻滤波器中的应用。对两种 SRR-DBDGS 结构及其传输特性进行了详细研究,并将其应用于双频带阻滤波器的设计中。

第 7 章为 CSRR 及其在阶梯阻抗低通滤波器中的应用。分析了微带接地面 CSRR 结构及其禁带特性,发现其具有陡峭的边带特性。针对这一特点,构造了一种高选择性 CSRR 阶

梯阻抗低通滤波器。为了有效地抑制高频段谐波,将补偿型耦合 DGS 与 CSRR 阶梯阻抗低通滤波器结合,构造了一种高选择性超宽阻带混合结构阶梯阻抗低通滤波器。

第 8 章为 CSRR 在双模贴片滤波器中的应用。将 CSRR 引入三角形贴片谐振器,构造了一种 CSRR 三角形双模贴片滤波器。

第 9 章为 CSRR CRLH 传输线及其在宽带滤波器中的应用。介绍了 CSRR CRLH 传输线及其特性。在此基础上,构造了一种具有优良高通特性的 IC-CSRR CRLH 传输线单元。又利用 IC-CSRR CRLH 传输线单元结合改进型非对称 DGS 低通滤波器,构造了一种高性能组合结构宽带带通滤波器。

本书是作者在总结近年来关于人工电磁结构及其应用的部分研究成果基础上编写而成的,可供国内同行参考。

本书由童创明主编。本书由付树洪、赵海洲、谢波、王金博编著,参加本书部分章节编写的还包括李西敏博士、姬伟杰博士、孙青博士、黄学宇博士、赵玉磊博士、钟卫军博士、周明硕士、邹雄硕士、余定旺硕士和吴利楠硕士等。本书的出版得到了军队“2110 工程”电磁场微波技术学科专业领域建设基金、毫米波国家重点实验室开放课题基金(K200818, K200907)和陕西省自然科学基金计划基金(2011JM8025)的资助,同时对西北工业大学出版社的大力支持表示感谢。

人工电磁结构研究及应用方兴未艾,谬误不足之处在所难免,请专家和读者指正。

编 者

2011 年 5 月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 人工电磁结构的概念	1
1.2 人工电磁结构及其在微波领域中的应用现状	1
参考文献	5
第 2 章 一维介质型电磁晶体研究	11
2.1 引言	11
2.2 基本原理	11
2.3 平面波展开法	12
2.4 算例及分析	16
2.5 周期矩量法	20
2.6 一维电磁晶体在传输线中的应用	25
参考文献	26
第 3 章 二维介质型电磁晶体研究	27
3.1 引言	27
3.2 平面波展开法	27
3.3 算例分析及设计	32
3.4 周期矩量法	38
3.5 EMT 在矩量法分析二维电磁晶体带隙结构中的应用	41
3.6 二维电磁晶体的仿真分析	43
参考文献	45
第 4 章 蘑菇谐振器及其在电磁带隙滤波器中的应用	46
4.1 引言	46
4.2 EBG 形成机理	46
4.3 蘑菇谐振器	47
4.4 蘑菇谐振器在电磁带隙滤波器中的应用	55
参考文献	58
第 5 章 特殊地面缺陷结构及其在低通滤波器中的应用	60
5.1 引言	60
5.2 特殊地面缺陷结构	61

5.3 特殊地面缺陷结构在低通滤波器中的应用	67
参考文献	72
第 6 章 SRR - DBDGS 及其在双频带阻滤波器中的应用	74
6.1 引言	74
6.2 SRR - DBDGS 特性分析	74
6.3 SRR - DBDGS 在双频带阻滤波器中的应用	79
参考文献	80
第 7 章 CSRR 及其在阶梯阻抗低通滤波器中的应用	82
7.1 引言	82
7.2 CSRR 及其禁带特性	82
7.3 CSRR 阶梯阻抗低通滤波器	84
7.4 混合结构阶梯阻抗低通滤波器	89
参考文献	93
第 8 章 CSRR 在双模贴片滤波器中的应用	94
8.1 引言	94
8.2 平面三角形谐振器	94
8.3 CSRR 三角形双模贴片滤波器	96
参考文献	100
第 9 章 CSRR CRLH 传输线及其在宽带滤波器中的应用	101
9.1 引言	101
9.2 CSRR CRLH 传输线	102
9.3 IC - CSRR CRLH 传输线	104
9.4 组合结构宽带带通滤波器	105
参考文献	108

第 1 章 概 论

1.1 人工电磁结构的概念

人工电磁结构(Electromagnetic Metamaterial)是指在自然界中本身并不存在或者没有被发现,而由人们根据电磁学理论的推导计算所设计并制作出来的,具有非常规电磁属性的人造媒质或材料^[1]。由于它通常是由两种或者两种以上的自然物质(通常是金属和介质)按照特定的规则组合而成的,所以也有学者把它叫做复合材料(Composite Material)^[2];Metamaterial一词本身也表达了“混合的”“合成的”材料^[3]的含义。但是在科学研究中,为了突出被研究对象的本质,把这些新型的材料统一定名为“人工电磁结构”。

事实上,人们对于人工电磁结构的研究由来已久。1987年,John和Yablonovitch等人在传统晶体概念基础上各自独立地提出了光子晶体(Photonic Crystal)的设计^[4-5]。光子晶体是一种非常典型的光子带隙(Photonic Band - Gap, PBG)结构,它的禁带效应功能是引起人们最大兴趣的所在。比如通过对材料介电常数的分布进行周期性调制,某些特定角度的入射波被临近的周期结构散射而产生干涉,发生类似布拉格(Bragg)衍射的现象。这些特定入射方向的能量由于衍射效应导致传播的群速度为零,因而被禁止通过,形成禁带。利用光子晶体的禁带机制,人们能够对光进行更加自如的控制。参照光子晶体的设计理念,加利福尼亚大学洛杉矶分校(UCLA)的Itoh等人提出了电磁带隙(Electromagnetic Band - Gap, EBG)结构的概念^[6]。电磁带隙结构的提出使人们能够在更加广阔的频谱范围内利用类似光子晶体的禁带效应。Itoh等人关于电磁带隙结构最初的制作方案是在微带电路上实现的。在微带线基板背面的接地平面上刻蚀出周期性的结构模式^[7],从而对波导基板的有效介电常数等属性进行调制,从而对通过的信号在微波段实现了特定的禁带。在这些工作的基础上,学者们进一步发现在微带电路的接地平面上刻蚀其他形状的缺陷结构(这样的缺陷结构可以是周期性的结构,也可以是非周期性的结构),同样可以达到类似的禁带效应。这种衍生的新的带隙材料的制作方法被称为地面缺陷结构(Defected Ground Structure, DGS)^[8]。此外,作为人工电磁结构中最具有代表性的材料之一,左手材料(Left - Handed Material, LHM)从一提出就受到了研究领域的学者和工程人员最广泛的关注^[9]。最近,在左手材料的基础上又发展了复合左右手(Composite Right/Left-Handed, CRLH)结构^[10],在微波工程领域的应用中取得了很好的效果。

1.2 人工电磁结构及其在微波领域中的应用现状

目前,微波领域广泛关注的人工电磁结构主要有电磁带隙结构、地面缺陷结构、开口环谐振器以及互补开口环谐振器结构等。下面将对这几种具有代表性的人工电磁结构的研究现状进行详细探讨。

1.2.1 电磁带隙结构

电磁带隙的概念实际上来自光子带隙概念的推广。光子晶体最初是在光学领域提出的,但是光学波段的尺度很小,加工工艺要求高,所以人工制作光子晶体存在一定困难。由于微波频段和光波都属于电磁波谱,共同遵从于 Maxwell(麦克斯韦)方程,所以这种周期性通过缩比关系扩展到了微波频段,进而加工上的难题不复存在。微波频段从理论、制备到实验测量都有相当成熟的技术和仪器设备,所以光子晶体在微波频段的研究快速开展起来,并且不断取得新的成果。微波光子晶体相关理论及应用研究已经成为一个重要方向,并且出现了一些新的专门用于微波频段的术语,如:电磁带隙结构、电磁晶体(Electromagnetic Crystals, ECs)等^[11]。EBG 结构按照周期可分为一维、二维和三维结构。一般来说,维度越高、尺寸越小、点阵结构越复杂,其制备的难度也就越大。从材料上看,EBG 结构又可分为介质型、金属型和介质金属型。

1991 年, Yablonovitch 等制作出了第一个具有全方位禁带的介质型 EBG 结构^[12],其频率禁带范围为 10~13 GHz。该结构加工在介质层上,在一个面上孔洞按三角栅格周期排列,每个孔洞都穿透 3 次,每一次都偏离法向 35°,在水平面内则以 120°三等分。Marc 等则提出了弯曲的介质型 EBG 结构^[13],此结构被用作天线反射器,与金属反射器相比,它可以产生更高的增益和波束宽度。此外,将介质型 EBG 结构放在天线上方,可以有效提高天线的方向性,制成高方向性天线^[14]。除介质型 EBG 结构外,还有金属型 EBG 结构。金属杆按照一定点阵排列起来,可以形成金属型 EBG 结构^[15]。这种结构的禁带可以从很低的频率(甚至零频)开始,带隙很宽。

除建立在空气中外,EBG 结构还可建立在某种媒质上,比如微带基片。由于微带电路和天线应用极为广泛,因此很多具有实际应用价值的 EBG 结构都是针对微带结构设计的。在微带介质基片上打孔,按照某种点阵结构周期排列,可以形成 EBG 结构。这种结构又称基片打孔型 EBG 结构,它被应用于各种平面天线的设计中。1993 年,美国研究人员率先将基片打孔型 EBG 结构应用于偶极子天线中。它是将基片打孔型 EBG 结构作为平面天线的底板,EBG 结构的带隙被设定在天线发射或接收频率范围内,所以采用这种结构可以减少能量在基底中的损失,从而提高发射或接收效率。另外一些研究人员将基片打孔型 EBG 结构作为偏馈贴片天线的底板^[16]。研究表明,此结构可以有效减小后向辐射,从而提高天线辐射效率。

介质型和金属型 EBG 结构的带隙特性较好,但是它们的体积大,不适合实际应用。介质金属型 EBG 结构很快成为研究的热点,它可以有效地减小 EBG 结构的尺寸和质量。它利用金属形成的等效电感、等效电容与介质材料介电常数来调节带隙的频率位置,所以禁带频率与周期尺寸可以不受布拉格散射条件的限制,实现小尺寸的 EBG,具有很好的实用价值。

一种介质金属型 EBG 结构是由 Sievenpiper 提出的基于蘑菇谐振器阵列的高阻电磁表面^[17]。它是制作在普通微带基片上的,微带介质的一侧印制有周期排列的金属小贴片,并且通过金属过孔与另一侧的接地板相连,其频率带隙可以设计在微波、毫米波甚至射频范围。该结构的尺寸可以达到波长的 1/10,相对前面提到的介质或金属型 EBG 结构,其整体结构相当紧凑,因此很快被重视。高阻表面的应用前景非常诱人,特别是在天线(阵)设计方面^[18]。由于高阻表面具有非常明显的表面波带隙,采用高阻电磁表面代替金属表面来做天线接地面,当天线的工作频率落在高阻表面的表面波带隙中时,高阻接地面可以抑制径向传播的表面波。

因此,与同样大小的普通金属接地面相比,有限大小的高阻接地面可以消除边缘与交角的绕射,改善天线辐射方向图,减小天线背瓣,提高天线增益。在天线尺寸允许的范围内,通过采用高阻表面可以明显降低天线单元之间的耦合,从而提高天线阵的整体性能。

另一种介质金属型 EBG 结构是由 Yang 提出的单面紧凑电磁带隙(Uni-planar Compact Photonic Band-Gap, UC-PBG)结构^[19]。与上面的高阻电磁表面相比,该结构没有金属过孔,但印制金属贴片的形状要复杂得多,其本质就是靠金属片之间的耦合提供电感和电容。这种结构不必打孔,加工工艺更为简单,但是其设计复杂,同时带隙特性也没有高阻电磁表面好。这种结构可用于制作滤波器、天线和 TEM 矩形波导等^[19-20]。

此外,针对微波传输线也提出了 EBG 结构。EBG 传输线的种类较多,但归纳起来主要有三种形成方式,即分别在金属导带、金属接地板和介质基板上周期打孔来实现。由于在介质板上打孔相对困难,不便于微波电路集成,而蚀刻金属导带的带阻效果不好,所以目前大多采用的传输线 EBG 结构为地面蚀刻型。它可以采用印制电路技术实现,设计简单。它的做法是在传输线(如微带或共面波导等)接地板上蚀刻周期排列的孔洞,主要沿着微带线传输方向,在横向上只需一排就可获得很好的带阻效果。目前,它已被用于天线的谐波抑制^[21]、微带线之间的互耦抑制^[22]及高性能滤波器设计^[23]等。

综上所述,EBG 结构在微波电路中主要采用的是平面结构、双平面结构或平面二维结构,其作用是抑制伪通带信号、消除高阶谐波响应或者抑制表面波,因此大多数应用集中在滤波器及天线等器件的设计上。此外,EBG 结构还可以用于辅助设计频率选择表面^[24]等。

1.2.2 地面缺陷结构

地面缺陷结构,又称地面开缝结构(Slotted Ground Structure, SGS),是在微带、共面波导等传输线的接地金属板上刻蚀周期或非周期的各种栅格结构,以改变电路衬底有效介电常数的分布,从而改变基于该介质上传输线的分布电感和分布电容,使此类型的传输线具有带隙和慢波特性的。第一个 DGS 单元是由韩国学者 Park 等提出的微带哑铃型 DGS 结构。与地面蚀刻型 EBG 结构相比,DGS 结构的优点在于无须建立周期结构即可在某些频率点产生谐振,提供良好的带隙特性;且只需一个 LC 等效电路模型就可表征,便于进行电路级的快速分析。在同等工艺条件和性能要求下,对考虑电路尺寸而言,DGS 结构较地面蚀刻型 EBG 结构在集成电路应用方面更具优势。自哑铃型 DGS 结构提出后,其特性的研究与应用引起了越来越多人的重视,逐渐成为微波电路设计领域的一个研究热点。

Park 等人最早将哑铃型 DGS 应用于低通滤波器^[25]设计,其在通带内波纹控制在 0.01 dB 以内,且在阻带内无寄生通带产生。Lim 等采用哑铃型 DGS 制作出了具有高阻抗特性的传输线,并将其运用于 4:1 威尔金森功分器的设计中^[26],与传统结构相比,电路减小面积达 83%。之后,他们采用哑铃型 DGS 进一步提高了功率放大器的功率输出和功率附加效率,有效地抑制了二阶谐波响应^[27]。Lee 等则采用哑铃型 DGS 制作了平面微带振荡器^[28],具有较高 Q 值的哑铃型 DGS 传输线大大降低了振荡器中存在的相位噪声。Sung 在耦合器接地板上引入哑铃型 DGS^[29]。研究发现,耦合器谐振频率大幅降低,因此耦合器的尺寸大为减小。此外,高次谐波也得到了有效抑制,三次谐波的抑制度不低于 30 dB。除此之外,哑铃型 DGS 还被广泛应用于天线^[30]、传输器^[31]等微波器件中。

为最大化地开发和利用 DGS 的独特性能,各种新型的 DGS 单元层出不穷。Kim 提出了

螺旋型 DGS 单元^[32],并分析了它的等效电路。之后,螺旋型 DGS 被用于放大器的小型化和抑制谐波^[33]、微带贴片天线的交叉极化抑制^[34]及高性能滤波器的设计^[35]等方面。Park 则提出了一种具有隔直缝隙和可加载耦合电容的新型 DGS 单元^[36],并将其应用于微波平面振荡器的设计中。最近,安建等将分形几何应用于 DGS 结构的设计中,提出了一种 Von Koch 分形缝隙 DGS 单元^[37],并将其与微带缝隙电容结合设计了一种超宽带滤波器,其具有超宽通带和良好的群速表现。此外,Safwat 在 DGS 结构的缝隙部分引入变容二极管(Varactor)实现了阻带可调^[38],这使 DGS 单元实现了可重构。

以上表明,DGS 在设计上注重单元的设计效率,在应用中大多数利用其单元对传输线等效电感和等效电容的调节作用所产生的阻带效应,而并不依赖周期性。因此,它的设计更加灵活、简便,使用 DGS 单元的器件往往具有更小的尺寸。DGS 的禁带特性可以有效地用于滤波器设计,也能够用于消除天线、放大器等器件中的谐波响应。此外,利用 DGS 单元有助于制作具有高阻抗特性的传输线,因而也被广泛应用于耦合器、功分器(功率分配器)等电路的设计中。由此可见,DGS 在设计微波和毫米波电路中有着非常广泛的应用。

1.2.3 开口环谐振器与互补开口环谐振器结构

在物质与电磁波的相互作用过程中,材料的电磁响应行为主要由其介电常数 ϵ 和磁导率 μ 决定。到目前为止,在自然界中依然没有发现介电常数和磁导率同时为负的媒质。对于这样一类媒质,苏联科学家 Veselago 从理论的角度研究了它们的电动力学性质^[39],并将之命名为“左手材料”。根据 Veselago 的研究成果,左手材料具有很多新奇的电磁学和光学特性,但不得不承认的是自然界从来没有发现这样的物质,这一颠覆性的概念一直处于无人理睬的尴尬境地。

随着光子晶体概念的提出,人工周期材料的研究引起了研究人员的极大兴趣。1996 年, Pendry 等人发现通过三维结构的金属细线(Wire)阵列模拟等离子体效应,可在小于其等离子体频率的波段范围内实现负等效介电常数。1999 年, Pendry 等又突破性地采用本身无磁性的金属开口环谐振器(Split Ring Resonator, SRR)作为单元组成的周期性结构,在稍大于其谐振频率的范围实现了负等效磁导率。Smith 等在此基础上迈出了关键一步,他们先在理论上研究了将 Wire 阵列和 SRR 阵列组合得到左手材料的可能性,然后在微波实验中合成了介电常数和磁导率同时为负值的材料,并成功地在实验室中观测到了微波频段的负折射效应^[40-41]。这一重大进展重新激发了人们研究左手材料的兴趣,左手材料成为了科学界的热门话题。

研究 SRR 对更好地认识左手材料是非常重要的。研究表明,当交变磁场从 SRR 轴向穿过时,在 SRR 的谐振频率附近会出现一段窄的阻带,阻碍电磁波的通过。SRR 具有很强的谐振特性,单个 SRR 即可产生阻带,而不需周期性结构,这与传统的 Bragg 散射原理是不同的。SRR 为控制电磁波传播提供了一个全新的途径,在微波波段出现了许多 SRR 结构器件和应用。

将 SRR 对称地加载到平面传输线(微带线、共面波导等)两侧即可获得明显的阻带特性^[42-43],通过组合不同谐振频率的 SRR 单元,阻带带宽可以比较容易地进行调节。与传统 EBG 微带线相比,在相同阻带特性下 SRR 加载微带线具有更小的电路尺寸。通过将变容二极管引入 SRR^[44],使 SRR 加载微带线的阻带在一定频率范围内进行任意调整,易于实现可重构。除平面传输线外,SRR 还被加载到金属波导中,制成金属波导带阻滤波器^[45-46],这种结构

可以实现阻带带宽可调和多阻带。在带阻特性研究基础上, SRR 加载传输线被应用于平行耦合线滤波器^[47]和贴片天线的谐波抑制^[48]。将 DGS 结构与双层 SRRs 结合, 武明峰等人提出了一种工作于双频段的微带线结构新型左手介质^[49]。与 DGS 结构相比, 其表现出奇异的双阻带特性。此外, SRR 还可应用于天线的设计。Francisco 等提出了一种新的利用 SRR 结构实现双频偶极子天线的设计方法^[50]。Kim 等则将 SRR 应用于电小尺寸方环天线的设计^[51]。除了应用于滤波器和天线设计外, SRR 还被应用于频率选择表面^[52]和多模谐振器^[53]等方面。

随着 SRR 研究的发展, 一些研究人员又提出了 SRR 的互补结构——互补开口环谐振器 (Complementary Split Ring Resonator, CSRR), 即在金属贴片上蚀刻开口环状缝隙。由于 CSRR 属于平面结构, 易于实现, 且具有单元尺寸小的优点, 因而为设计平面微波器件提供了便利。在谐振频率附近, CSRR 的介电常数会达到较大的值, 使得电磁波经过一个谐振单元发生的相位变化达到 180° , 从而抑制信号的传播, 形成阻带。通过在传输线接地面(或导带)的信号传播方向蚀刻得到若干个 CSRR, 可以形成良好的阻带, 并且在阻带之外保证微带线的通带正常工作, 从而得到尺寸紧凑的带阻滤波器^[54-56]。

微波滤波器是 CSRR 的重要应用之一。在不增加原滤波器尺寸的情况下, 通过在阶梯阻抗谐振器上引入 CSRR 后, 寄生通带可以得到有效抑制^[57]。除此之外, CSRR 在滤波器中的应用实例还有许多^[58-66], 如金属波导和介质集成波导滤波器。近几年, CSRR 还被应用于平面天线方面。利用 CSRR 带陷特性可以制作出超宽带带陷天线^[67], 通过调整 CSRR 尺寸使超宽带天线在 5.2 GHz 或 5.8 GHz 附近避免电磁干扰。在普通微带贴片天线的金属接地板上蚀刻出周期性 CSRR 可以得到超介质基片天线^[68]。与普通结构相比, 该结构具有更小的尺寸和更宽的带宽。由 CSRR 阵列构成的超介质基片很好地解决了天线尺寸和带宽这对矛盾。此外, 一些研究人员还在贴片上引入缝隙型 CSRR 作为非对称微扰, 从而激励天线产生圆极化辐射, 制作出了 CSRR 圆极化微带贴片天线结构^[69]。

CSRR 可以实现复介电常数, 将其与可以实现负磁导率的平面结构相结合, 调节它们的谐振频率, 可以实现双负左手特性。在微带线结构的接地面上引入 CSRR 的同时, 在微带线上蚀刻缝隙电容, 调整它们的尺寸, 就可以获得左手性质的通带, 这样就可以实现平面左手结构^[70], 其又被称之为基于 CSRR 的复合左右手传输线。CSRR CRLH 传输线的应用涉及多种微波器件, 如滤波器、功分器、双工器、耦合器等^[70-72], 这些微波器件可以实现小型化、多频和宽频工作。

由于 SRR 和 CSRR 是亚波长的谐振结构, 因此尺寸紧凑。又因为是平面结构, 具有便于集成的特点, 所以被用于设计诸多微波器件。除应用于左手材料的开发和研究外, SRR 和 CSRR 已经成为平面微波电路提高性能和实现小型化的重要技术之一。

参 考 文 献

- [1] 邹勇卓. 新型人工电磁材料器件的设计、制作和应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [2] Sergei T. Analytical modeling in applied electromagnetics[M]. Boston: Artech House, Inc., 2002.
- [3] Pearsall J E. The New Oxford Dictionary of English[M]. Oxford: Oxford University Press, 1998.

- [4] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(23): 2486 – 2489.
- [5] Yablonovitch E, Gmitter T J, Leung K M. Photonic band structure; the face-centered cubic case employing nonspherical atoms[J]. Physical Review Letters, 1991, 67: 2295 – 2298.
- [6] Radisic V, Qian Y X, Coccioli R, et al. Novel 2 – D photonic bandgap structure for microstrip lines[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1998, 8(2): 69 – 71.
- [7] Yang F R, Ma K P, Qian Y X, et al. A uniplanar compact photonic-bandgap (UC – PBG) structure and its applications for microwave circuits[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. , 1999, 47(8): 1509 – 1514.
- [8] Chul – Soo K, et al. A novel 1-D periodic defected ground structure for planar circuits [J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 2000, 10(4): 131 – 133.
- [9] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. Physical Review Letters, 2000, 85(18): 3966 – 3969.
- [10] Caloz C, Sanada A, Itoh T. A novel composite right-/left-handed coupled-line directional coupler with arbitrary coupling level and broad bandwidth[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2004, 52(3): 980 – 992.
- [11] 付云起, 袁乃昌, 温熙森. 微波光子晶体天线技术[M], 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [12] Thevenot M, Cheype C, Reineix A, et al. Directive photonic-bandgap antennas[J], IEEE Trans. Microwave Theory Tech. , 1999, 47(11): 2115 – 2122.
- [13] Lin Q C, Zhu F M, He S L. A new photonic band-gap cover for a patch antenna with a photonic band-gap substrate[J]. Journal of Zhejiang University Science, 2004, 5(3): 269 – 273.
- [14] Poilasne G, Pouliguen P, Mahdjoubi K, et al. Experimental radiation pattern of dipole inside metallic photonic bandgap material[J]. Microwave Opt Technol Letters, 1999, 22(1): 10 – 16.
- [15] Gonzalo R, Maagt P D, Sorolla M. Enhanced patch-antenna performance by suppressing surface waves using photonic-bandgap substrates[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. , 1999, 47(11): 2131 – 2138.
- [16] Sievenpiper D, Zhang L J, Broas R J, et al. High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. , 1999, 47(11): 2059 – 2074.
- [17] 付云起. 微波光子晶体及其应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.
- [18] Coccioli R, Yang F R, Ma K-P, et al. Aperture-coupled patch antenna on UC-PBG substrate[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. , 1999, 47(11): 2123 – 2130.
- [19] Horri Y, Tsutsumi M, Harmonic control by photonic bandgap on microstrip patch antenna, IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1999, 9(1): 13 – 15.
- [20] Kevin M, Leong H, Andrew C, et al. Coupling suppression in microstrip lines using

- a bi-periodically perforated ground plane[J]. IEEE Microwave and Wireless Componets Letters, 2002, 12(5): 169 – 171.
- [21] Kim T, Seo C. A novel photonic bandgap structure for low-pass filter of wide stop-band[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 2000, 10(1): 13 – 15.
- [22] Harry C, Zhang L, Alexopoulos N G. Thin frequency-selective lattices integrated in novel compact MIC, MMIC, and PCA architectures[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. , 1998, 46(11): 1936 – 1948.
- [23] Ahn D, Park J S, Kim C S, et al. A design of the low-pass filter using the novel microstrip defected ground structure[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. , 2001, 49(1): 86 – 93.
- [24] Lim J S, Lee S W, Kim C S, et al. A 4 : 1 unequal Wilkinson power divider[J]. IEEE Microwave and Wireless Componets Letters, 2001, 11(3): 124 – 126.
- [25] Lim J S, Kim H S, Park J S, et al. A power amplifier with efficiency improved using defected ground structure[J]. IEEE Microwave and Wireless Componets Letters, 2001, 11(4): 170 – 172.
- [26] Lee Y T, Lim J S, Park J S, et al. A novel phase noise reduction technique in oscillators using defected ground structure[J], IEEE Microwave and Wireless Componets Letters, 2002, 12(2): 39 – 41.
- [27] Sung Y J, Ahn C S, Kim Y S. Size reduction and harmonic suppression of rat-race hybrid coupler using defected ground structure[J]. IEEE Microwave and Wireless Componets Letters, 2004, 14(1): 7 – 9.
- [28] Sung Y J, Kim M, Kim Y S. Harmonics reduction with defected ground structure for a microstrip patch antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2003, 2: 111 – 113.
- [29] Chen X Q, Shi X W, Guo Y C, et al. A novel dualband transmitter using microstrip defected ground structure[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2008, 83: 1 – 11.
- [30] Kim C S, Lim J S, Nam S, et al. Equivalent circuit modeling of spiral defected ground structure for microstrip line[J]. Electron Letters, 2002, 38(19): 1109 – 1110.
- [31] Lim J S, Jeong Y C, Ahn D, et al. Size-reduction and harmonic-rejection of microwave amplifiers using spiral-defected ground structure// 33rd European Microwave Conference[C]. Munich: [作者不详], 2003: 1421 – 1424.
- [32] Guha D, Biswas M, Antar Y M M. Microstrip patch antenna with defected ground structure for cross polarization suppression[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2005, 4(1): 455 – 458.
- [33] Shi J, Chen J X, Xue Q. A quasi-elliptic function dual-band bandpass filter stacking spiral-shaped CPW defected ground structure and back-side coupled strip lines[J]. IEEE Microwave and Wireless Comp. Letters 2007, 17(6): 430 – 432.
- [34] Park J S, Jung M S. A novel defected ground structure for an active device mounting

- p>and its application to a microwave oscillator[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2004, 14(5): 198 – 200.
- [35] An J, Wang G M, Zeng W D, et al. UWB filter using defected ground structure of Von Koch fractal shape slot[J]. Progress in Electromagnetics Research Letters, 2009, 6: 61 – 66.
- [36] Safwat A M E, Podevin F, Ferrari P, et al. Tunable bandstop defected ground structure resonator using reconfigurable dumbbell-shaped coplanar waveguide[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. , 2006, 54(9): 3559 – 3564.
- [37] Veselago V G. Electrodynamics of substances with simultaneously negative electrical and magnetic permeabilities[J]. Sov. Phys. Usp, 1968, 10(4): 5 – 12.
- [38] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. Physical Review Letters. 1996, 76(25): 4773 – 4776.
- [39] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. Science, 2001, 292(6): 77 – 79.
- [40] Falcone F, Marín F, Bonache J, et al. Coplanar waveguide structures loaded with split-ring resonators[J]. Microwave Opt Technol Letters, 2004, 40(1): 3 – 6.
- [41] García-García J, Bonache J, Gil I, et al. Comparison of electromagnetic band gap and split-ring resonator microstrip lines as stop band structures[J]. Microwave Opt Technol Letters, 2005, 44(4): 376 – 379.
- [42] Gil I, Bonache J, García-García J. et al. Tunable metamaterial transmission lines based on varactor-loaded split-ring resonators[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. , 2006, 54(6): 2665 – 2674.
- [43] Kehn M N M, Quevedo-Teruel, Rajo-Iglesias E. Split-ring resonator loaded waveguides with multiple stopbands[J]. Electron. Letters, 2008, 44(12): 714 – 716.
- [44] Jitha B, Nimisha C S, Aanandan C K, et al. SRR loaded waveguide band rejection filter with adjustable bandwidth[J]. Microwave Opt Technol Letters, 2006, 48(7): 1427 – 1429.
- [45] García-García J, Martín F, Falcone F, et al. Spurious passband suppression in microstrip coupled line band pass filters by means of split ring resonators[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2004, 14(9): 416 – 418.
- [46] Lee J G, Lee J H. Suppression of spurious radiations of patch antennas using split-ring resonators (SRRs) [J]. Microwave Opt Technol Letters, 2006, 48(2): 283 – 287.
- [47] 武明峰, 孟繁义, 吴群, 等. 基于 DGS 和双层 SRRs 结构的左手介质微带线的设计[J]. 物理学波, 2006, 55(111): 5790 – 5794.
- [48] Herraiz-Martínez F J, García-Munoz L E, González-Ovejero D, et al. Dual-frequency printed dipole loaded with split ring resonators[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009, 8: 137 – 140.

- [49] Kim Y J, Lee H M. Electrically small square loop antenna with a capacitive split ring resonator cover structure[J]. *Microwave Opt Technol Letters*, 2009, 51(3): 831 – 835.
- [50] 蒋俊, 谢拥军, 王瑞, 等. 基于 SRR 结构的多频带频率选择表面[J]. *电子器件*, 2009, 32(1): 174 – 177.
- [51] Zhao H, Cui T J. Novel triple-mode resonators using split-ring resonator[J]. *Microwave Opt Technol Letters*, 2007, 49(12): 2918 – 2922.
- [52] Ying X, Alphones A. Propagation characteristics of complimentary split ring resonator (CSRR) based EBG structure[J]. *Microwave Opt Technol Letters*, 2005, 47(5): 409 – 412.
- [53] Falcone F, Lopetegi T, Baena J D, et al. Effective negative- ϵ stopband microstrip lines based on complementary split ring resonators[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2004, 14(6): 280 – 282.
- [54] Kim J, Cho C S, Lee J W. CPW bandstop filter using slot-type SRRs[J]. *Electron. Letters*, 2005, 41(24): 1333 – 1334.
- [55] García-García J, Bonache J, Falcone F, et al. Stepped-impedance lowpass filters with spurious passband suppression[J]. *Electron. Letters*, 2004, 40(14): 881 – 883.
- [56] Karthikeyan S S, Kshetrimayum R S. Compact, deep, and wide rejection bandwidth low-pass filter using open complementary split ring resonator[J]. *Microwave Opt Technol Letters*, 2011, 53(4): 845 – 848.
- [57] Karthikeyan S S, Kshetrimayum R S. Harmonic suppression of parallel coupled microstrip line bandpass filter using CSRR[J]. *Progress in Electromagnetics Research Letters*, 2009, 7: 193 – 201.
- [58] Bonache J, Martín F, García-García J, et al. Ultra wide band pass filters (UWBPF) based on complementary split rings resonators[J]. *Microwave Opt Technol Letters*, 2005, 46(3): 283 – 286.
- [59] Zhang J, Cui B, Lin S, et al. Sharp-rejection low-pass filter with controllable transmission zero using complementary split ring resonators (CSRRs)[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2007, 69: 219 – 226.
- [60] Wu B, Li B, Liang C H. Design of lowpass filter using a novel split-ring resonator defected ground structure[J]. *Microwave Opt Technol Letters*, 2007, 49(2): 288 – 291.
- [61] Lai X, Li Q, Qin P Y, et al. A novel wideband bandpass filter based on complementary split-ring resonator[J]. *Progress in Electromagnetics Research C*, 2008, 1: 177 – 184.
- [62] Wu G L, Mu W, Dai X W, et al. Design of novel dual-band bandpass filter with microstrip meander-loop resonator and CSRR DGS[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2008, 78: 17 – 24.
- [63] Zhang X C, Yu Z Y, Xu J. Novel band-pass substrate integrated waveguide (SIW) filter based on complementary split ring resonators (CSRRs)[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2007, 72: 39 – 46.
- [64] Bahrami H, Hakkak M. Analysis and design of highly compact bandpass waveguide

- p>filter utilizing complementary split ring resonators (CSRR)[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2008, 80: 107 – 122.
- [65] Liu L, Yin Y Z, Jie C, et al. A compact printed antenna using slot-type CSRR for 5.2 GHz/5.8 GHz band-notched UWB application[J]. Microwave Opt Technol Letters, 2008, 50(12): 3239 – 3242.
 - [66] Lee Y, Hao Y. Characterization of microstrip patch antennas on metamaterial substrates loaded with complementary split-ring resonators[J]. Microwave Opt Technol Letters. 2008, 50(8): 2131 – 2135.
 - [67] Zhang H, Li Y Q, Chen X, et al. Design of circularpolarization microstrip patch antennas with complementary split ring resonator[J]. IET Microw. Antennas Propag, 2009, 3(8): 1186 – 1190.
 - [68] 牛家晓. 谐振式左手传输线结构及其应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
 - [69] Bonache J, Sisó G, Gil M, et al. Application of composite right/left handed (CRLH) transmission lines based on complementary split ring resonators (CSRRs) to the design of dual-band microwave components[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2008, 18(8): 524 – 526.
 - [70] Wu B, Fan J W, Zhao L P, et al. Design of dual-band filter using defected split-ringresonator combined with interdigital capacitor[J]. Microwave Opt Technol Letters, 2007, 49(9): 2104 – 2106.

第2章 一维介质型电磁晶体研究

2.1 引言

一维介质型电磁晶体(周期分层介质结构)是一种最为简单的人工电磁结构,它存在于日常生活中的许多方面,例如微波炉中的磁电管、极化凸透镜上的防紫外线保护层等。对于微波领域,其主要应用于波导内部、反射面天线以及高方向性电磁晶体天线的设计中^[1-2]。数值分析在电磁晶体的结构设计和工程应用中占据着非常重要的地位。本章主要描述平面波展开法和周期矩量法分析一维电磁晶体的基本理论,研究介电常数比、填充率等参数对带隙的影响。这不仅可以帮助理解介质型电磁晶体的带隙形成机理,而且可以对介质型电磁晶体结构以及各种电磁晶体天线的设计和优化提供理论支持。为叙述方便,本章所述的一维电磁晶体即指一维介质型电磁晶体。

2.2 基本原理

2.2.1 麦克斯韦方程组

麦克斯韦方程组(Maxwell's Equations)作为宏观电磁现象的总规律,是分析电磁场问题的基本出发点。在计算关于电磁波传播的问题时,都会考虑它。在无源的情况下,麦克斯韦方程组的微分表示形式如下:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.1a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.1b)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (2.1c)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.1d)$$

式中, $\mathbf{E}$ 为电场强度, $\mathbf{B}$ 为磁感应强度, $\mathbf{H}$ 为磁场强度, $\mathbf{D}$ 为电通量密度。

2.2.2 电磁波在介电常数周期性分布媒质中的传播

电磁晶体的介电常数在空间上周期分布,属于典型的周期性结构。电磁波入射在此周期性结构上,相邻单元的电场是由一个复传播常数联系起来的。当其只在 z 方向呈一维周期分布时,电场可表示为

$$E(x, y, z + a) = E(x, y, z) e^{-j\beta_0 a} \quad (2.2)$$

可见, $E(x, y, z)$ 是关于 z 的周期函数,周期为 a 。式(2.2)中, β_0 代表 z 方向上0次谐波的相位