周期性结构在毫米波波导同轴转换中应用

周 焱 苏东林

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 波导同轴转换连接器是微波、毫米波通信和测试中非常重要的器件. 基于 PBG(Photonic Band-Gap)和阶梯阻抗变换结构在导波系统中对电磁波传播性能的影响,探讨和研究了将这 2 种周期性结构应用在 8 mm 波导同轴转换连接器的设计中的情况,通过在同轴腔内导体介质支撑垫中布置二维 PBG 结构抑制同轴部分横向溢散的电磁波,通过在波导腔体内增加阶梯阻抗结构,改善阻抗变换效率,提高波导同轴转换器件的传输性能. 仿真和实验证明了这种 PBG/阶梯阻抗变换结构在毫米波波段同轴波导转换设计应用中的有效性,改善了系统的性能及稳定性,在不增加通常的调谐器件情况下,在较宽的频带范围内有效降低了驻波比.

关 键 词: 光带隙; 阶梯阻抗变换; 波导同轴转换; 毫米波

中图分类号: TN 454

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)04-0412-05

Application of periodical structure in millimeter waveguide coaxial connecter

Zhou Yan Su Donglin

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Waveguide coaxial connecter has been playing a very important role in microwave & millimeter-wave communications and tests. On the basis of the effects of PBG(photonic band-gap) structure and step impedance conversion structure in transmitting electromagnetic wave system, a novel waveguide coaxial connecter for 8mm has been discussed and studied based on above two structures, the 2D air column structure in dielectric support cushion depress the dissipation of electromagnetic wave in coaxial structure, at the same time, the step impedance conversion structure improve the performance of waveguide to coaxial port, these two conversion structures in designing of 8 mm waveguide coaxial connecter. Simulations and measurement accuracy proved that this structure has the capability of improving the communication performance of millimeter waveguide coaxial connecter and reducing VSWR(voltage standing wave ratio) at a very wide frequency band without additional components used for tuning.

Key words: photonic band gap; step impedance conversion; waveguide coaxial connecter; millimeter waves

1 波导同轴转换连接器简介

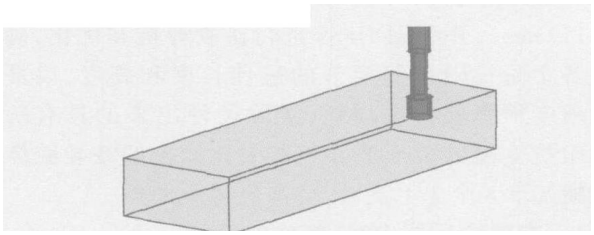
波导同轴转换连接器在微波电路中应用广泛,是雷达设备、精确制导和微波测试系统中的重要无源连接器件,特别是在毫米波波段且对传输功率有比较高要求的场合,波导同轴结构是最有效的转换器件. HP 和 Wiltron 公司是国际上制作这种器件两家最大、技术水平最高的公司. 国内目前设计制作较多的是 3 cm 和 2 cm 器件,多数是仿照 HP 公司的产品,在毫米波波段由于国际市场上的禁运,在国内基本上没有毫米波段的 HP 同轴波导转换连接器的自行设计产品. Wiltron 公司虽然可以提供达到 40 GHz 的器件,但其在毫米波波段的性能只能达到电压驻波比 VSWR(Voltage

收稿日期: 2005-03-22

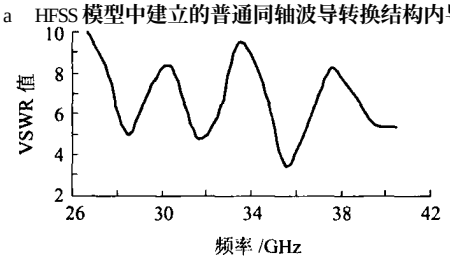
基金项目: 武器装备预研基金项目(51410050203HK0161); 国防科技重点实验室基金资助项目(51437030105HK010)

作者简介: 周 焱(1974 -),男,河北石家庄人,博士生,zhy2004bj @ee. buaa. edu. cn.

Standing Wave Ratio)值 ≥1.3(数据根据 Wiltron 公司的资料),而且需要调谐螺钉,使用不是很方便.在文献[1,2]等对同轴-矩形波导转换连接器的理论分析及数值计算的基础上,分析国外的几种 8 mm波导同轴转换器件之所以传输性能不理想的主要原因在于同轴内导体支撑介质层的设计很难控制,以致传输电磁波横向泄漏比较大(主要是介质上所传播的表面波);同时矩形波导腔的 377Ω到同轴 20Ω特性阻抗的变换在器件尺寸很小时,也难以将匹配设计得很好. Wiltron 和 HP 的产品中主要是依靠在矩形波导腔体上增加调谐螺钉阵列(一般是在整个器件制作完成后,加 5～6 个螺钉不断地调谐匹配,如图 1 所示按 Wiltron 同等器件建立的模型仿真结果,不加调谐螺钉,性能并不理想),来调谐阻抗失配,非常繁琐.针对这样的情况,将周期性光带隙(PBG,Photonic Band-Gap)结构的设计观点引入到毫米波导波结构设计中,在同轴部分中的支撑内导体的介质中设计圆形 PBG 空气柱环行阵列,抑制在支撑介质层中电磁波的横向发散和不稳定性,提高系统的传输性能;并将这种周期性设计思想应用到矩形波导的结构设计中,以周期性阶梯阻抗变换的结构替代通常的矩形腔体结构,以实现阻抗的平稳过度和宽带滤波.这种结构的 8 mm 波导同轴转换是不同于 Wiltron 和 HP 公司的毫米波器件的,是一种新颖的设计方法,实验表明了其设计的有效性.在设计中,利用 Ansoft 公司的 HFSS 的有限元分析仿真平台,可以建立整个结构和零部件的精确模型,并通过反复的仿真、优化以得到最理想的结构尺寸,提高了设计速度和准确度.



a　HFSS 模型中建立的普通同轴波导转换结构内导体



b　VSWR 仿真结果

图 1　传统的波导同轴转换结构及 VSWR 仿真结果

2　PBG结构对电波传播特性影响

2.1　PBG概论

PBG 源于对光子晶体(PC,Photonic Crystal)的研究.光子晶体理论由美国加洲理工大学的教授 E. Yablonovitch 1987 年在光学物理领域中提出.光子晶体具有在不同的方向上不同带隙结构的特性,从而可以在一定的频率下在特定的方向上对光波产生衰减,阻碍光的传播. PBG 的原理是从光子晶体中得出,只是不局限于光波和光学领域,在微波或毫米波频段,利用具有周期性的结构 PBG 材料或结构,可以在一维、二维和三维上产生带阻传输特性,在一些频率上　　或阻止电磁波的传播,达到非常独特的效果.目前作为热点研究领域,PBG 在光通信设备、微带电路、贴片天线和矩形波导等很多微波领域都有很广泛的应用,如文献[3～6].

周期性 PBG 结构可以多种方法实现,比如平面微带结构,光导纤维结构以及介质层或介质柱变化的结构等. PBG 结构的特性主要由以下因素决定:周期单元的数目、周期单元的几何结构、周期单元的排列方式和介质的介电常数等.介质板传播的表面波会对微波和毫米波电路产生消极影响:它可能在高介质板的电路中降低电磁波的传输效率,或者在电路中不同部件产生不必要的耦合.而在介质板上设计 PBG 结构,可以抑制掉特定频率的表面波.在介质中进行 PBG 结构的设计方法比较灵活,适合于在微小器械中的应用.本文的介质支撑垫的 PBG 结构就是以这样的理论基础设计的.

2.2　二维 PBG结构改善同轴腔电波传播特性

在介质层中设置 PBG 结构可以有 2 种方式实现,即介质柱阵列和空气腔排列结构.而空气腔的结构所得到的阻带带宽可以更宽一些,也易于加工和整体承重力更强.在空气腔截面形状对 PBG 性能的影响上,方形孔较圆形孔可获得更好控制的频带特性,但其带宽不是特别理想,而圆形孔可以应用在较宽的频率范围内,并且易于加工,这也是其倍受青睐的原因.而如图 2 中显示,交错排列可以得到更好的填充比控制和对阻带电磁波的更充分滤除.所以在同轴腔内的介质支撑垫上的 PBG 设计采用一种径向的交错排列的空气腔 PBG 圆形结构,其对横向电磁波的阻带效果还是很好的.

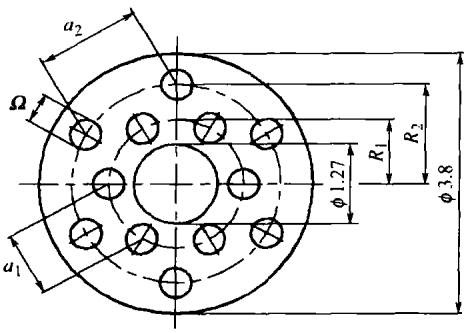


图2 PBG介质支撑垫单元及各部分设计尺寸

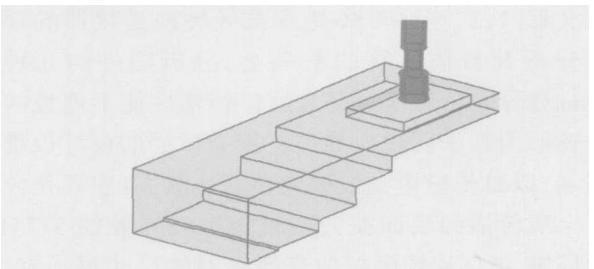
3 波导同轴连接器周期性结构设计

3.1 波导同轴转换的设计概念

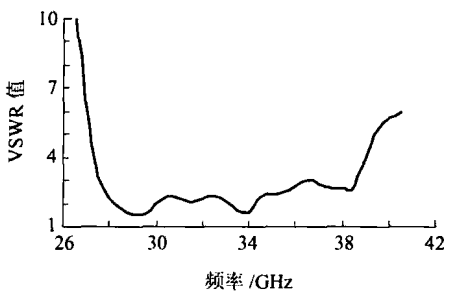
波导同轴转换连接器的理论已经比较成熟,简单的说就是阻抗变换和模式变换,将波导口处的377Ω特性阻抗变换到同轴的50Ω,将TE_{10}模变换到TEM模.其具体的数值理论分析在文献[1,2]中进行了详细的论证.而要在实际设计时很好的控制各个尺寸部件的形状、尺寸以及内导体、同轴和矩形波导之间的匹配都不是很容易的,需要精确的设计.采用的结构是首先在同轴腔体内设置PBG内导体介质支撑垫,在矩形波导腔体内设计阶梯阻抗变换结构,同轴内导体直接插在最上的阻抗变换节上,同时PBG的设计,内导体的形状、激励位置,阻抗变换节各节的尺寸以及后端短路面的位置等都由在HFSS上建模后反复地仿真和优化.

3.2 阶梯阻抗变换结构的设计

阶梯阻抗变换结构的设计已经应用到很多微波无源电路中了,它也是一种周期性的结构,每节的特性阻抗都是待匹配阻抗与前一节阻抗的几何平均值,使前后阻抗得到很好的匹配.在宽带系统中,一般采用多节阶梯阻抗变换结构,各阻抗阶梯所产生的反射波彼此抵消,于是匹配的频带得以展宽.采用阶梯阻抗变换主要是对从矩形波导口的377Ω空气阻抗向同轴转换部分的激励源内导体耦合部分50Ω的平稳匹配过度,这在2 cm或3 cm的器件中可能不需要,可以通过不断地调试内导体和同轴波导结合位置加以修正阻抗匹配.而在8 mm器件中,由于尺寸太小,不可能对内导体或同轴波导的结合位置调整太多,波导到同轴内导体激励的微小阻抗失配就会引起很大的回波损耗,这时引入这种阶梯阻抗变换的结构可以大大加强器件转换的阻抗匹配,使得整个器件的传输性能得以改善.如图3所示,基本上将平均VSWR值拉回到2附近.



a HFSS中建立的阶梯变换模型



b VSWR仿真结果

图3 增加周期性阶梯阻抗变换结构波导同轴转换模型及VSWR仿真结果

这里每节的长度都取$\lambda/4$,相当于电长度$\theta=\pi/2$.各个阶梯变换节的导引波长与阻抗有关,即各节的实际长度是不相等的,近似为

$$l_i = \frac{\lambda_{g1} \times \lambda_{g2}}{2 \times (\lambda_{g1} + \lambda_{g2})} \tag{1}$$

其中 λ_{g1},λ_{g2}分别为通带的频率上限和下限.但在实际中,如果有n节阶梯阻抗变换,就会有$n+1$个阶梯阻抗变换的不连续性.对于这种情况,根据8 mm矩形波导口的标准尺寸(3.556 mm × 7.112 mm),并利用HFSS进行仿真分析和优化,确定各个阶梯阻抗变换节的最佳长度和高度,以最大限度地降低传输损耗.实际设计出来的具有阶梯阻抗变换的矩形波导腔体要比原先的波导腔体大概短5/8个1/4波长,结构显得更简短.

3.3 支撑介质层PBG结构的设计

通过仿真,分析双层结构可控范围及参数都比单介质支撑垫的结构要灵活,而且上下2层都比较薄,加工时对同心度的要求相对不太苛刻,强度也符合要求.对于介质中的PBG结构,结构的周期间距决定着结构的中心截止频率,因此有了中心截止频率,就可以反推出结构的周期间距.截止频率与周期间距的关系可以用下面这个方程表示:

$$f_{stop} = c/(2a\beta/\beta_0) \tag{2}$$

式中　c 是光的传播速度;β 为周期结构中的传播常数;β_0 为在自由空间中的传播常数;a 为周期间距;f_{stop} 为中心截止频率. 在这里 β 近似等于没有周期结构的普通介质层的 β 值. 针对 8 mm 同轴结构,中心频率 $f_0 = 37.5$ GHz,设计使用频带为 26.5～42.5 GHz. 双介质层的结构可以避免由于机加工打孔的同心度不准确所带来得误差,降低电磁波在介质层中的溢散.

这种空气柱交错排列的结构具有较宽的带隙,所以设计介质层的 PBG 结构是内外 2 层的空气柱结构,通过仿真可知,填充比在 0.15～0.65 都有比较明显的带隙产生(填充比在 0.55 左右带隙最明显),而最终取填充比内圈为 0.46,外圈为 0.19,这样的填充比并不是仿真得到的最佳填充比,而是综合考虑到同轴接头在与外部接头配合工作时,内导体所施加给介质层的压力以及加工微小圆形空气腔所能达到的加工精度和便利性等因素而取的最折中的数值. 同样这样的结构其实是平面交错排列的空气腔的一种变形,由于采用了 HFSS 建模(如图 4),精确地描绘了整个器件的最精细和复杂的部分,使可以很方便地分析这种结构.

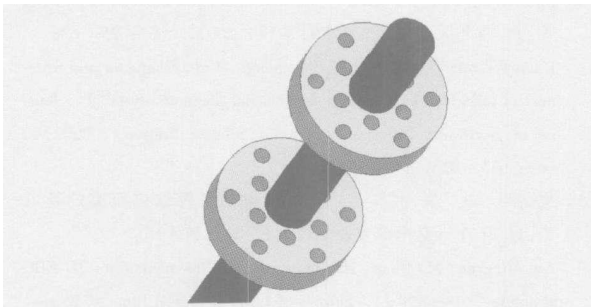


图 4　在 HFSS 软件中建立的 PBG 支撑介质垫模型

4　实验仿真

在 HFSS 上建立完整的同轴波导转换的周期性结构,其中用于 FEM 计算的区域如图 5 所示.

图 5 显示了所建立模型的 PBG 空气柱部分,同轴内导体及与矩形波导耦合部分,同轴腔内的 PBG 结构介质衬垫,整个波导同轴转换器数值计算的空气区域,通过 HFSS 仿真整个系统的性能. 图 6 为 PBG 介质层电场和磁场的仿真结果.

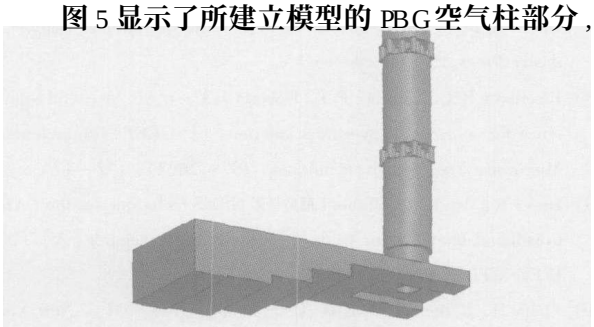
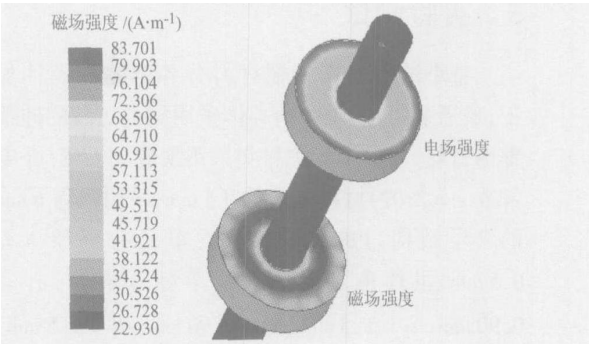
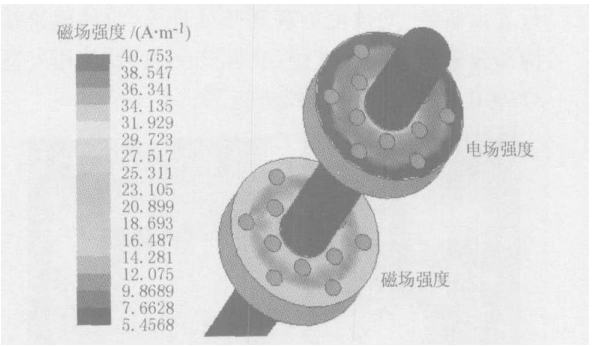


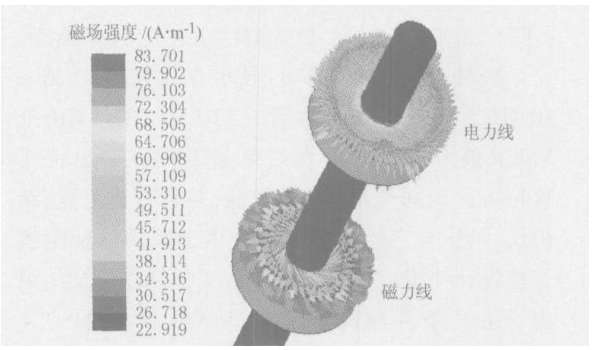
图 5　PBG/阶梯阻抗变换-波导同轴转换仿真模型



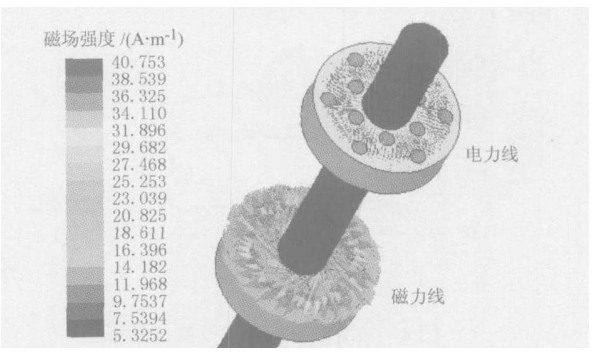
a　未加 PBG 结构的电场强度和磁场强度图



b　PBG 结构的电场强度和磁场强度图



c　未加 PBG 结构的电力线和磁力线图



d　PBG 结构的电力线和磁力线图

图 6　PBG 结构介质层的电场、磁场以及电力线和磁力线与未加 PBG 的结构仿真比较

从图6看到PBG结构将电场和磁场大大地缩紧到内导体柱的附近,抑制了电磁波在同轴腔体内的横向溢散,提高了整个系统的传输效率.

5 实验测试

整个结构采用黄铜材料分各个零件设计加工,最后装配.同轴中内导体采用硬度更高的硅锰青铜材料,内导体支撑衬垫采用聚四氟乙烯(介电常数 $\varepsilon = 2.07$)材料,厚度为1 mm,采用间隔6 mm的双层结构,PBG单元尺寸:单元孔直径 $b = 0.5$ mm,里外单元周期和环半径分别为: $a_1 = 0.90$ mm, $a_2 = 1.5$ mm, $R_1 = 0.90$ mm, $R_2 = 1.5$ mm.如图7所示,全部零件都在精密机床上加工,并进行表面研磨、光洁度处理和热处理等,阶梯阻抗结构部分采用精装工艺组装.制作完成后,使用安立37369B矢量网络分析仪进行测试.

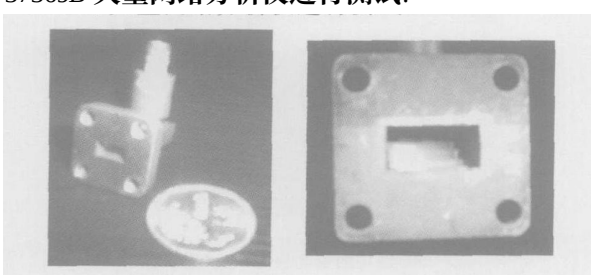


图7 组装成形的PBG/阶梯阻抗变换波导同轴转换器

FEM仿真结果(图8)显示VSWR值在25～40 GHz宽频带范围内达到1.13以下,37.5 GHz处VSWR值为1.102.仿真结果显示性能明显优于Wiltron公司同类40 GB的产品,并且带宽更宽,结构尺寸更小(主要是波导部分由于采用阶梯阻抗变换设计使得腔体短了一些).实际制作测试结果由于工艺条件和加工误差,VSWR值在24.2～37.9 GHz频段内 ≤1.2,在37.9～40.6 GHz频段内 ≤1.25.

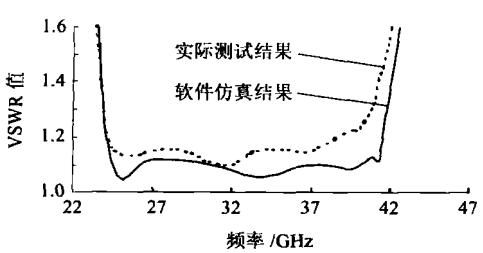


图8 VSWR最终仿真及测试结果

6 结束语

通过将周期性电路结构引入到毫米波波段波导同轴转换连接器的设计中,利用PBG结构和周期性阶梯阻抗变换结构在电磁波传播中的特性,抑制支撑介质中的电磁波横向损耗,提高阻抗匹配和转换耦合度,在不增加制造加工复杂程度的条件下,实现了8 mm同轴波导转换.特别是双层PBG介质结构的使用,大大解决了同轴内导体支撑垫表面波泄漏的问题,提高了同轴波导转换的性能.性能优于国外同类8 mm产品,而且不用加波导腔体调谐螺钉阵列,结构简单可靠,具有比较好的工程应用前景.

参考文献(References)

[1] Williamson A G. Analysis and modeling of "two-gap" coaxial line rectangular waveguide junctions[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1983,31(3):295～302

[2] Williamson A G. Cross-coupled coaxial-line/rectangular-waveguide junction[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1985,33(3): 277～280

[3] 武东升,顾培夫,刘 旭,等.一维光子晶体及其应用[J].激光与光电子学进展,2001(12):1～6
Wu Dongsheng, Gu Peifu, Liu Xu, *et al*. Rearch progresses and applications of one-dimensional photonic crystal [J]. Laser & Optronics Progress, 2001(12):1～6(in Chinese)

[4] 陈慰宗,忽满利,李绍雄,等.一维光子晶体禁带的特点及增宽[J].西北大学学报(自然科学版),2002,32(6):625～628
Chen Weizong, Hu Manli, Li Shaoxiong, *et al*. Character and wideness of forbidden band of one-dimensional photonic crystal[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2002, 32(6): 625～628(in Chinese)

[5] 樊明延,胡 荣,郝 清,等.二维电磁带隙结构研究的新方法[J].红外与毫米波学报,2003,22(2):127～131
Fan Mingyan, Hu Rong, Hao Qing, *et al*. New method for 2D-EBG structures' research[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2003,22(2):127～131(in Chinese)

[6] 刘 青,李承芳,张 翔,等.二维光子晶体带隙结构的研究[J].激光杂志,2002,23(2):33～35
Li Qing, Li Chengfang, Zhang Xiang, *et al*. The study of 2D photonic crystal band gap[J]. Journal Laser, 2002,23(2):33～35(in Chinese)

[7] 林为干.微波网络[M].北京:国防工业出版社,1978
Lin Weigan. The microwave net[M]. Beijing: National Defense Industry Press,1978(in Chinese)

[8] Eisenhart R L, Greiling P T, Roberts L K, *et al*. A useful equivalence for a coaxial-waveguide junction[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1978,26(3): 172～174

[9] Beyer R, Arndt F. Efficient MM/FE GSMS technique for the CAD of broadband lateral coax feeds in rectangular waveguide[A]. 2000 IEEE MTT-S Digest[C], 2000.109～112

[10] John D, Robert D, Joshua N. Photonic crystals[M]. New York: Princeton University Press, 1995