

DOI: 10.3785/j.issn. 1006-754X. 2013. 01. 014

# 基于 EBG 结构的基片集成波导超宽带带通滤波器

李丹<sup>1</sup>, 童创明<sup>1,2</sup>, 彭鹏<sup>1</sup>, 余定旺<sup>1</sup>, 邹雄<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学 防空反导学院, 陕西 西安 710051; 2. 毫米波国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 为拓展带通滤波器的通带带宽, 设计了一种基于 EBG 结构的基片集成波导(SIW)超宽带带通滤波器。该滤波器利用箭头形电磁带隙结构的阻波特性, 将不同大小箭头形结构单元蚀刻在 SIW 上金属面, 以获得超宽带通带。所设计的滤波器中心频率在 9.85 GHz, 相对带宽为 39.59%, 通带内的最大插入损耗约为 1.54 dB, 相比于类似结构的带通滤波器, 其带内回波损耗较大, 且整体电路面积较小。测量结果与仿真结果基本吻合, 有效地验证了该设计方法的有效性。

**关键词:** 电磁带隙; 超宽带; 基片集成波导

中图分类号: TN 713; TN 015

文献标志码: A

文章编号: 1006-754X(2013)01-0065-05

## A ultra-wideband bandpass filter of substrate integrated waveguide based on EBG

LI Dan<sup>1</sup>, TONG Chuang-ming<sup>1,2</sup>, PENG Peng<sup>1</sup>, YU Ding-wang<sup>1</sup>, ZOU Xiong<sup>1</sup>

(1. Aerial Defense and Antimissile Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. State Key Laboratory of Millimeter Waves, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** To improve the bandwidth of bandpass filter, a new arrowhead-shaped electromagnetic band gap (EBG) ultra-wideband bandpass filter based on substrate integrated waveguide (SIW) was proposed. The filter was designed based on the band-stop characteristics of EBG and had obtained ultra-wideband by etching different dimensional arrowhead on the surface of substrate integrated waveguide. The ultra-wideband bandpass filter with a center frequency at 9.85 GHz and relative fractional bandwidth 39.59% showed good bandpass characteristics, while the insertion loss was less than 1.54 dB. Compared with similar bandpass filter, the return loss of the filter in the passband is better than others with much smaller circuit size. The good agreement between the measured results and the simulation results demonstrates that the design of this proposed filter is effective.

**Key words:** electromagnetic bandgap (EBG); ultra-wideband bandpass; substrate integrated waveguide (SIW)

电磁带隙(electromagnetic band-gap, EBG)材料<sup>[1]</sup>, 又称电磁晶体(electromagnetic crystals, EC), 是一种介电常数周期分布的周期性结构。它的一个重要性质就是具有电磁带隙特性, 即某些频率的电磁波在其中是不能通过的。最初对于此种结构的研究被限定在光学领域。后来人们研究发现, 这种

周期结构可以通过缩放尺寸扩展至其它频率范围, 甚至可以扩展到毫米波和微波频段<sup>[2-3]</sup>。近年来, 电磁带隙结构在微波和毫米波领域的应用已经引起了人们极大的研究兴趣。

最近几年, 电磁带隙结构在基片集成波导中的应用迅速发展起来, 利用电磁带隙结构设计的基片

收稿日期: 2012-05-02。

基金项目: 陕西省自然科学基础研究计划项目(2011JM8025)。

作者简介: 李丹(1988—), 男, 陕西大荔人, 硕士生, 从事基片集成波导的应用研究, E-mail: dylidan@163.com。

通信联系人: 童创明(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 从事雷达系统、电磁场数值计算、微波毫米波电路等研究, E-mail: chmtong@126.com。

集成波导滤波器可具有超宽带性。当前利用电磁带隙结构设计的基片集成波导滤波器有：矩形槽带隙结构和蝶形带隙结构带通滤波器以及东南大学郝张成设计的电磁带隙滤波器<sup>[4-6]</sup>。本文在分析集成波导传输特性和 EBG 结构带阻特性的基础上，利用 SIW 的高通特性，通过在基片集成波导表面刻蚀一定规律的箭头形带隙结构，在高频端形成阻带，即研究基于箭头形带隙结构的 SIW 超宽带滤波器。相比于类似结构，其带内回波损耗较大，且整体尺寸较小。

在微波毫米波电路设计中，周期性结构是一种非常有意义的电路，有些周期结构具有很好的低通滤波特性，而基片集成波导具有极好的高通特性。因此，如果能够将这些周期结构和基片集成波导集成在一起，将会获得带通滤波器。

## 1 电磁带隙(EBG)形成原理

EBG 结构的应用是基于带隙的存在与大小，因此在设计和应用 EBG 结构之前，必须深刻理解 EBG 的形成机理。对于不同的 EBG 结构，其带隙形成机理有所不同。EBG 结构的周期性引起散射波相位的周期分布，各单元的散射波造成反向叠加而相互抵消，从而形成了频率带隙，称之为 Bragg 散射机理。EBG 结构的带阻特性与周期性单元结构的尺寸、周期大小及其材料的介电常数密切相关；同时，EBG 结构还具有慢波效应和高阻抗特性。电磁带隙(EBG)应用于微波波段时<sup>[7]</sup>，可以阻止特定频段的电磁波传输，类似于对电磁波的阻带作用，即电磁带隙(EBG)具有滤波特性。

根据布拉格(Bragg)散射条件，可知

$$2k = k_{\text{bragg}} \frac{2\pi}{a}, \quad (1)$$

式中  $k$  为导波模波数， $a$  为 EBG 结构单元的周期间隔。 $a$  与波导波长  $\lambda_g$  存在以下关系：

$$a = \frac{\lambda_g}{2}, \quad (2)$$

即 EBG 结构的周期间隔  $a$  为波导波长  $\lambda_g$  的  $1/2$ 。利用基片集成波导(SIW)在一定条件下和矩形波导之间的等效关系近似求出蚀刻带隙结构的基片集成波导的波导波长  $\lambda_g$ 。

由于带隙结构中心频率为  $f_0$ ，基片集成波导(SIW)波导波长  $\lambda_g$  的计算公式为

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{\beta}, \quad (3)$$

其中

$$\beta = \sqrt{k_0^2 \epsilon_r - (\frac{\pi}{w})^2}, \quad (4)$$

式中  $k_0 = (2\pi f_0)/c$  为自由空间波数， $\epsilon_r$  为介质的相对介电常数， $w$  为 SIW 宽边的等效宽度。

由此可知，当基板材料选定以后，Bragg 散射型 EBG 结构的阻带特性受周期影响很大，这对电路的小型化是不利的。因此，研究人员又提出了另一些 EBG 结构，利用周期单元自身的谐振效应，形成带隙，为局域谐振机理。

实际工程设计中，EBG 结构的带隙形成往往受到 2 种机理的共同作用，不同情况下其谐振机理亦不同。

## 2 带通滤波器的结构设计

### 2.1 基片集成波导的设计

箭头形带隙结构基片集成波导滤波器是在基片集成波导的上表面蚀刻规则箭头槽而构成的宽带带通滤波器。选取 SIW 尺寸为 2 排通孔的中心距离  $W=15.6$  mm，基片的厚度  $h=1$  mm，金属通孔直径  $d=0.4$  mm，相邻金属通孔的中心距离  $p=0.8$  mm，介电常数  $\epsilon_r=2.2$ ，损耗角正切  $\tan \sigma=0.001$ 。根据基片集成波导宽度与等效矩形波导宽度之间等效的经验公式以及截止频率公式<sup>[8]</sup>，可计算出 SIW 截止频率约为 6.5 GHz。用 HFSS11 对 SIW 传输特性进行仿真，仿真结果如图 1 所示。

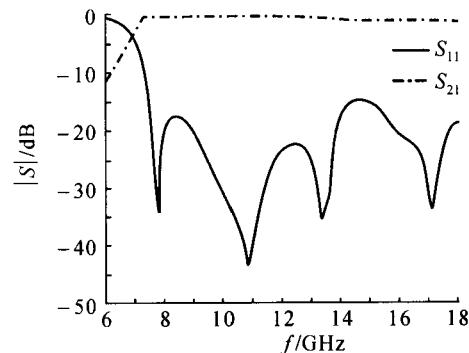


图 1 基片集成波导的仿真结果

Fig. 1 The simulated results of SIW

由图 1 可以看出：该尺寸的集成波导截止频率为 6.7 GHz，与计算出的截止频率 6.5 GHz 基本吻合，展示了典型的高通特性。频率在 7 GHz 以上具有较好的电磁波传输性能，而且在通带内频率升高，插入损耗变大，但未出现阻带特性。

### 2.2 箭头形结构单元特性分析

箭头形带隙结构影响 SIW 的传输特性，单个箭头形结构图及其等效电路如图 2 所示。箭头上、下两个三角形为等边三角形。

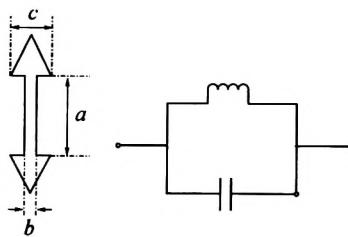


图2 箭头的结构图和等效电路

Fig. 2 The arrowhead-shaped structure resonant unit cell and equivalent circuit models

为验证加载箭头单元结构 SIW 的带隙特性,利用 Ansoft HFSS11 对单个单元结构进行了全波仿真及分析。单箭头结构参数为:  $a = 4 \text{ mm}$ ,  $b = 0.8 \text{ mm}$ ,  $c = 2 \text{ mm}$ 。对加载单个箭头形结构的 SIW 传输特性进行仿真,仿真结果如图 3 所示。

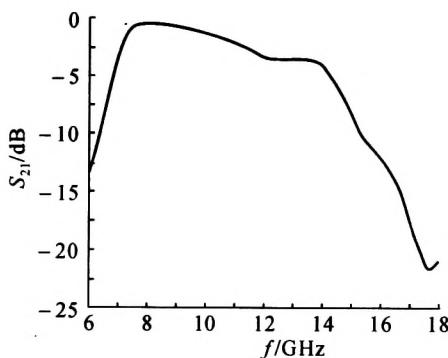


图3 单箭头结构的仿真结果

Fig. 3 The simulated results of one arrowhead-shaped cell

通过分析图 3 可知:加载箭头形单元结构的 SIW 在高频端(大约为 14 GHz)有一个明显的阻波特性出现,阻带最大衰减大于 20 dB。而图 1 中未加载箭头形带隙结构的 SIW 没有明显阻波存在,验证了 EBG 带阻特性的存在。因此,应用此结构可以实现带通性能。

### 2.3 周期单元个数对滤波器带通特性的影响

在微波毫米波电路设计中,周期性结构的周期单元个数影响着 SIW 的传输性能。为分析周期单元个数对带隙结构传输特性的影响,分别对加载箭头形结构单元数  $n=1, 3, 5$ ,箭头间隔为 3 mm 的 SIW 传输特性进行仿真,其仿真结果如图 4 所示。

通过分析图 4 可知,随着单元个数的增加,阻带特性愈加明显,且阻带深度加大,单元个数的增加对通带中心频率不会产生明显影响。随着单元个数的增加,阻带特性及带外抑制特性有明显的加强,但单元个数增加必然造成滤波器尺寸的增加。

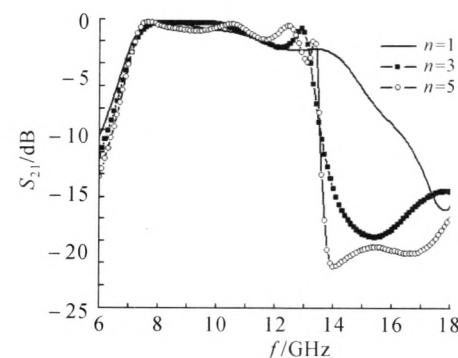


图4 不同箭头个数的阻波特性

Fig. 4 Band-stop characteristics with different amount arrowhead

### 2.4 缝隙对滤波器带通特性的影响

由等效电路可知,缝隙的长宽变化会影响等效电路中电容、电感参数,进而影响谐振频率的位置。加载箭头形结构 SIW 的带隙特性主要受箭头缝长  $a$  的影响。分析 3 种尺寸(如表 1 所示)的箭头形单元结构的阻带特性。对 3 种尺寸单元的传输特性进行了仿真,得到传输参数的仿真结果如图 5 所示。

表1 3种尺寸单元

Table 1 Three different sizes of cell mm

尺寸	$a_1$	$a_2$	$a_3$
尺寸 1	4.0	3.0	2.0
尺寸 2	3.5	2.5	1.5
尺寸 3	4.5	3.5	2.5

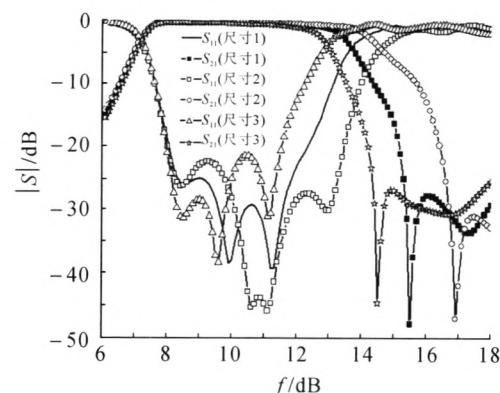


图5 3种尺寸单元的传输特性仿真

Fig. 5 The simulated results of three filters with different size

通过分析图 5 及表 2 可知:低频段的阻带频率就是 SIW 的截止频率,不随缝长的变化而变化,但缝长的大小影响高频端的阻带特性,当缝长变化时,20 dB 回波损耗的起始频率基本不变,而箭头缝长

越大,高频端的阻带起始频率越小,通带中心频率越小,20 dB 回波损耗相对带宽越小,因此可通过调节箭头缝长调节中心频率。

表 2 不同尺寸的传输特性

Table 2 The simulated results of different size

尺寸	-20 dB 带宽 范围/ GHz	通带中心 频率 $f_c$ / GHz	通带内最大 回波损耗/ dB	相对 带宽/ %
1	8.04~12.3	10.17	-25.0	41.9
2	8.00~13.4	10.52	-22.3	51.3
3	7.96~11.5	9.73	-21.4	36.3

## 2.5 带通滤波器的结构

在微波毫米波电路设计中,周期性结构是一种非常有意义的电路,有些周期结构具有很好的低通频率特性,而基片集成波导具有极好的高通特性。因此,如果能够将这些 EBG 结构和基片集成波导集成在一起,将会获得超宽带带通滤波器。根据这个原理,设计了一个五级 SIW-EBG 带通滤波器,该滤波器的平面结构如图 6 所示。

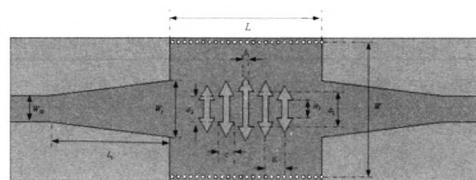


图 6 滤波器的结构图

Fig. 6 Structure of filter

在加工制作之前对该滤波器进行了仿真,对其物理尺寸进行了优化,最后得到尺寸参数如表 3 所示。

表 3 滤波器尺寸

Table 3 Dimensions of filter mm

参数	W	L	$L_t$	$L_{50}$	h	$W_t$	$W_{50}$
数值	15.6	19.5	15.5	5	1	6.5	3
参数	$a_1$	$a_2$	$a_3$	b	c	g	
数值	4	3	2	0.8	2	2.5	

## 2.6 仿真与测试结果

为验证设计的有效性,按照设计结果进行加工,箭头形结构 SIW 超宽带带通滤波器实物结构如图 7 所示。利用 HP8720ET 矢量网络分析仪测试制作的电路。设计优化后的 EBG 结构 SIW 滤波器仿真与测试结果如图 8 所示,可以看出在低频段的传播特性完全和基片集成波导相同,EBG 结构仅对高

频段起到阻波效果。通过仿真结果得出滤波器的中心频率为 10.17 GHz,在 8.04~12.3 GHz 的通带内,最大插入损耗等于 0.7 dB,回波损耗大于 20 dB 的相对带宽约为 41.9%。高频段带外抑制均大于 27.7 dB。通过测试结果得出滤波器的中心频率为 9.85 GHz,在 7.9~11.8 GHz 的通带内,最大插入损耗约为 1.54 dB,回波损耗大于 20 dB 的相对带宽约为 39.59%。高频段带外抑制均大于 28.6 dB。测试结果和仿真结果基本吻合。

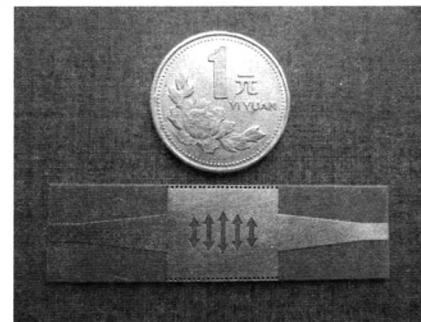


图 7 箭头形结构 SIW 超宽带带通滤波器实物

Fig. 7 The object of arrowhead-shaped ultra-wideband SIW bandpass filter

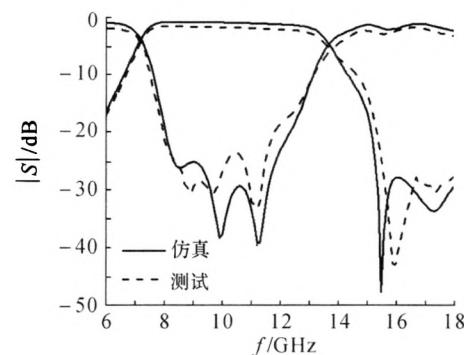


图 8 S 参数仿真与测试结果

Fig. 8 Simulated and measured result of S-parameter

所设计的带通滤波器与文献[4-6]中的带通滤波器相比较,带内回波损耗增大,如表 4 所示。

表 4 带内最小回波损耗的比较

Table 4 Comparison of the lowest return loss in passband

比较项	本文	文献[4]	文献[5]	文献[6]
带内最小回波损耗/dB	25	11	10.87	15

同时可以看出,在高频阻带内,该滤波器的  $S_{11}$  和  $S_{21}$  都很小,这表明有很大一部分能量被辐射出去了。造成这些损耗的原因主要在两方面,首先是 EBG 所造成的损耗,其次是由于构成基片集成波导侧墙的金属通孔之间的距离受限制,从而导致侧壁的漏波损

耗在高频工作时增大。另外还有导体损耗和介质损耗,这些损耗只是占据了总体损耗的一小部分。

### 3 结论

针对箭头形 EBG 结构在微波电路中的应用问题,本文提出了一种新颖的 SIW 带通滤波器。在此结构中,箭头形 EBG 结构不仅在 SIW 高通端有效引入带隙特性,而且使整个结构获得了较宽的通带。对所提出的结构进行了仿真和测量,测试结果表明,所设计的滤波器在 -20 dB 通带带宽约为 39.59%,这种带通滤波器结构紧凑,同时还具有超宽带、插入损耗小、通带宽等优点,在常规平面电路和器件中具有一定应用价值。

### 参考文献:

- [1] RADISTIC V, QIAN Yong-xi. Novel 2-D photonic bandgap structure for microstrip lines[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letter, 1998, 8(2): 69-71.
- [2] 付云起. 微波光子晶体及其应用研究[D]. 长沙: 国防科技大学研究生院, 2004: 6-10.
- [3] FU Yun-qi. Electromagnetic characteristics of microwave photonic crystals and applications[D]. Changsha: National University of Defense Technology, Graduate School, 2004: 6-10.
- [4] 付树洪. 人工电磁结构及其在微波滤波器中的应用研究[D]. 西安: 空军工程大学导弹学院, 2011: 8-18.
- [5] FU Shu-hong. Electromagnetic metamaterial and its application to microwave filters[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, Missile Institute, 2011: 8-18.
- [6] ZHANG Cheng-hao. Compact super-wide bandpass substrate integrated waveguide (SIW) filters [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(9): 2938-2977.
- [7] 陈世勇. 蝶型槽基片集成波导带通滤波器[J]. 重庆理工大学学报, 2011, 34(6): 127-131.
- [8] CHEN Shi-yong. Substrate integrated waveguide bandpass filter based on butterfly radial slot[J]. Journal of Chongqing University of Technolog, 2011, 34 (6): 127-131.
- [9] 田树林. 基片集成波导和带隙结构的带通滤波器[J]. 重庆理工大学学报, 2010, 24(6): 52-55.
- [10] TIAN Shu-lin. Bandpass filter of substrate integrated waveguide and band gap structure [J]. Journal of Chongqing University of Technolog, 2010, 24(6): 52-55.
- [11] KIMT, SEO C. A novel photonic bandgap structure for low-pass filter of wide stopband[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Lett, 2000, 10(1): 13-15.
- [12] YAN L, HONG W, WU K, et al. Investigations on the propagation characteristics of the substrate integrated waveguide based on the method of lines[J]. IEE Proceedings: Microwaves, Antennas and Propagation, 2005, 152(1): 35-42.

(上接第 34 页)

- [3] 胡佳音, 陈新明, 高宇清. 自行海底作业车履带式底盘虚拟样机建模探讨[J]. 矿业研究与开发, 2003, 23(4): 32-33.
- [4] HU Jia-yin, CHEN Xin-ming, GAO Yu-qing. Discussion on the modeling of virtual prototype for the crawler chassis of self-propelled sea-bed service vehicle[J]. Mining Research and Development, 2003, 23(4): 32-33.
- [5] 熊光明, 高峻晓, 陆际联. 轻型履带式移动机器人虚拟样机实现方法[J]. 计算机仿真, 2005, 22(7): 133-135.
- [6] XIONG Guang-ming, GAO Jun-yao, LU Ji-lian. Implementation approach of virtual prototype for portable tracked mobile robots[J]. Computer Simulation, 2005, 22(7): 133-135.
- [7] 蒋琴仙. 数字化产品基本装配过程及关键匹配要素的研究[D]. 南京: 南京理工大学机械制造与自动化系, 2001: 23-40.
- [8] JIANG Qin-xian. Research on the basic assembly process

of digital product and key matching elements [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, Department of Mechanical Manufacture and Automation, 2001: 23-40.

- [9] 郑勇. 坦克发动机关键部件的可视化装配仿真系统及其技术研究[D]. 南京: 南京理工大学机械制造与自动化系, 2003: 25-54.
- [10] ZHENG Yong. Research on the visual assembly simulation system and technology about key parts of tank engine [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, Department of Mechanical Manufacture and Automation, 2003: 25-54.
- [11] 王涛, 李宏才, 闫清东. 车辆综合传动装置虚拟装配研究[J]. 车辆与动力技术, 2009(4): 16-19.
- [12] WANG Tao, LI Hong-cai, YAN Qing-dong. Study on virtual assenly of vehicle integrated transmission equipment[J]. Vehicle & Power Technology, 2009(4): 16-19.

## 微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题，有资深工程师领衔主讲，课程既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，设计原理和设计仿真实践相结合，向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



### 微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频，专家授课，中文讲解，直观易学；既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

### 更多专业培训课程：

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>