

# 新型 S 形 EBG 结构的超宽带基片集成波导带通滤波器

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

(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** 利用 S 形电磁带隙结构的阻波特性和超宽带特性,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。该滤波器通过将不同大小的 S 形结构单元蚀刻在 SIW 上金属面,以获得超宽带。所设计的带通滤波器工作频带范围为 7.85~10.21 GHz,中心频率为 9.03 GHz,相对带宽为 26.14%,通带内的最大插入损耗约为 1.54 dB,相比于文献[8~10]中类似 EBG 结构的带通滤波器,回波损耗较优,且具有结构紧凑、通带选择性好等优点。测量结果与仿真结果基本吻合,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

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.03.013

**中图分类号** TN713<sup>+</sup> **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)03-0054-04

## A New Ultra-wideband Bandpass Filter of Substrate Integrated Waveguide(SIW) Based on S-shaped EBG

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

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. State Key Lab of Millimeter Waves, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** A novel S-shaped electromagnetic band gap (EBG) ultra-wideband band-pass filter based on substrate integrated waveguide (SIW) is proposed. The filter is designed based on the band-stop characteristics of EBG and can obtain ultra-wideband by etching different dimensional S-shaped on the surface of substrate integrated waveguide. The designed band-pass filter with a center frequency as 9.03 GHz and relative fractional bandwidth 26.14% shows good band-pass characteristics with the frequency band between 7.85~10.21 GHz while the insertion loss is less than 1.54 dB and still the designed filter has the advantage of narrow band-pass, low insertion loss, compacted and good selectivity etc. that's better than the results in the reference[8~10]. the good agreement between the measured results and the simulated results demonstrates that the design of this proposed filter is effective.

**Key Words:** electromagnetic band-gap (EBG); ultra-wideband band-pass; substrate integrated waveguide (SIW)

电磁带隙(Electromagnetic Band Gap, EBG)结构是一种具有带阻特性<sup>[1]</sup>、慢波特性和高等效特性阻抗的周期性慢波结构,它能够使特定阻抗频段

内的电磁波完全不能在其中传输,具有明显的禁带特性<sup>[5]</sup>。这种完全依靠自身结构实现带阻特性的光子带隙结构具有制作简单、体积小、重量轻、便于集

收稿日期:2012-11-19

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2011JM8025);毫米波国家重点实验室基金资助项目(K201201)

作者简介:李丹(1988-),男,陕西大荔人,硕士生,主要从事基片集成波导应用研究. E-mail: dyliidan@163.com

成等优点,在微波电路的集成性、重量及成本上都具有不可替代的优势。自从电磁带隙这一概念提出后的十几年来,电磁带隙结构已经引起了许多研究机构的极大关注。

基片集成波导(Substrate Integrated Waveguide, SIW)器件具有高 Q 值和低损耗等特点,并能方便地实现与微带线、共面波导等平面传输线的集成,且易于设计和加工,可以广泛应用于微波毫米波集成电路中,尤其是微波毫米波系统小型化中<sup>[6-7]</sup>。当前用集成波导构成的微波器件有天线、滤波器、功分器、双工器等。

滤波器可具有超宽带特性,其中包括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的郝张成设计的电磁带隙滤波器,但回波损耗基本都在 15 dB 左右。本文是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 S 形带隙结构,设计了在高频端形成阻带的一种新型超宽带滤波器。

## 1 带通滤波器的结构设计

### 1.1 S 形带隙结构的特性分析

S 形带隙结构基片集成波导滤波器是采用在基片集成波导的上表面蚀刻规则 S 形槽构成的超宽带带通滤波器。某些频率的电磁波落在电磁带隙内,被完全禁止在 EBG 结构中,从而产生阻波特性和,而基片集成波导具有极好的高通特性。因此,将 EBG 结构应用到 SIW 中,可实现滤波效果。

S 形带隙结构影响 SIW 的传输特性,单个 S 形结构图及其等效电路见图 1。为验证加载 S 形单元结构 SIW 的带隙特性,通过 Ansoft HFSS11 对单个单元结构进行了全波仿真及分析。选取的 SIW 尺寸为 2 排通孔的中心距离  $W=15.6\text{ mm}$ ,基片的厚度  $h=1\text{ mm}$ ,金属通孔直径  $d=0.4\text{ mm}$ ,相邻金属通孔的中心距离  $p=0.8\text{ mm}$ ,介电常数  $\epsilon=2.2$ ,损耗角正切  $\tan\sigma=0.001$ 。单 S 形结构参数为: $a=2.6\text{ mm}$ , $b=0.9\text{ mm}$ , $e=4.4\text{ mm}$ 。对加载单个 S 形结构的 SIW 传输特性进行仿真,仿真结果见图 2。

通过分析图 2 可知:加载 S 形单元结构的 SIW 在高频端(大约 12.7 GHz 左右)有一个明显的阻波特性和,而未加载箭头形带隙结构的 SIW 却没有明显阻波存在,这验证了加载 S 形单元结构的 SIW 在高频端带阻特性的存在。因此,应用此结构可以实现带通性能。

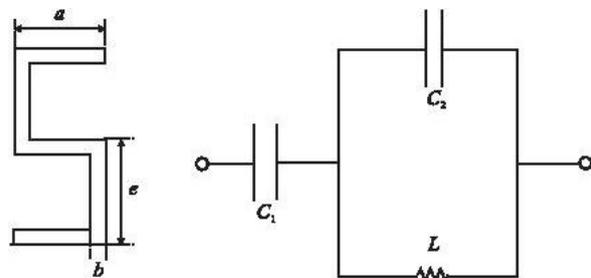


图 1 单个 S 形结构图和等效电路

Fig.1 The S-shaped structure resonant unit and equivalent circuit models

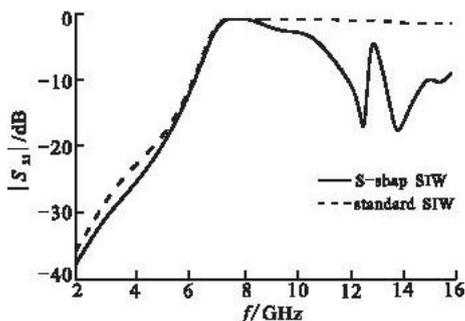


图 2 单个 S 形结构的仿真结果

Fig.2 The simulated results of one S-shaped structure

### 1.2 缝隙对滤波器带通特性的影响

由等效电路可知,S 形的缝长  $e$  的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 S 形 EBG 结构 SIW 的带隙特性主要受 S 形缝长的影响。为分析不同 S 形的缝长对 SIW 的带隙特性的影响,设计了 3 种加载不同缝长的 5 级 S 形 EBG 结构滤波器,每个 S 形之间的间隔为 0.8。3 种不同缝长的尺寸见表 1。对 3 种加载不同缝长的 5 级 S 形 EBG 结构滤波器的传输特性进行了仿真,仿真结果见图 3。

表 1 3 种尺寸单元

Tab.1 Three different size cells mm

尺寸	$e_1$	$e_2$	$e_3$
1	4.2	3.6	3.0
2	4.4	3.8	3.2
3	4.6	4.0	3.4

通过分析图 3 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 S 形的缝长越大,高频端的阻带起始频率越小,通带中心频率越小。分析等效电路可知,S 形缝长越大,电荷在金属贴片与接地面以及金属贴片与导带之间积累越多,等效电容就越大。等效电容  $C_1$  和  $C_2$  增大,谐振频率随之减小,因此,可通过调节 S 形的缝长调节中心频率。

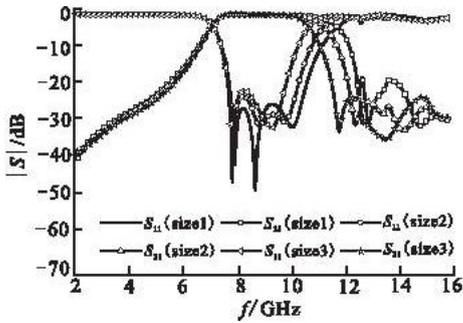


图3 3种尺寸单元的传输特性

Fig.3 The simulated results of three different size

表2 不同尺寸的传输特性

Tab.2 The simulated results of different size

尺寸	-20 dB 带宽范围/GHz	$f_0$ /GHz	相对带宽/%
1	7.74~10.67	9.21	31.8
2	7.72~10.36	9.04	29.2
3	7.68~9.89	8.79	25.1

表3 滤波器参数尺寸

Tab.3 Dimensions of filter

mm

$W$	$L$	$L_i$	$L_{50}$	$h$	$W_i$	$W_{50}$	$d$	$p$	$a$
15.6	19.5	15.5	5	1	6.5	3	0.4	0.8	2.6
$a$	$a'$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$e_1$	$e_2$	$e_3$	$g^1$	$g^2$
2.2	1.8	0.9	0.8	0.7	4.4	3.8	3.2	0.8	0.8

## 2 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,S形结构 SIW 带通滤波器实物结构见图 5。利用 HP8720ET 矢量网络分析仪测试制作的电路,由于频率到 10 GHz 左右时,此结构的滤波器需考虑辐射损耗。

在测试时为防止辐射以及外界电磁波对测量的影响,把制作的滤波器放在屏蔽盒中进行测量。设计优化后的 EBG 结构 SIW 滤波器仿真与测试结果见图 6,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。仿真结果得出滤波器的中心频率 9.02 GHz,在 7.73 GHz 到 10.31 GHz 的通带内,最大插入损耗等于 0.44 dB,回波损耗大于 25.1 dB 的相对带宽约为 28.6%。高频段带外抑制均大于 24.9 dB,带内回波损耗达到了 30.2 dB,并且在 12.5 GHz 产生了传输零点。通过测试结果得出滤波器的中心频率 9.03 GHz,在 7.85 GHz 到 10.21 GHz 的通带内,最大插入损耗等于 1.54 dB,回波损耗大于 20 dB 的相对带宽约为 26.14%。高频段带外抑制均大于 24.8 dB,带内回波损耗达到了 22.8 dB,并且在 12.5 GHz 产生了传输零点。测试结果和仿真结果

## 1.3 带通滤波器的结构

根据以上原理,设计了一个 5 级 S 形 SIW-EBG 带通滤波器,该滤波器的平面结构见图 4。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,最后得到尺寸参数见表 3。

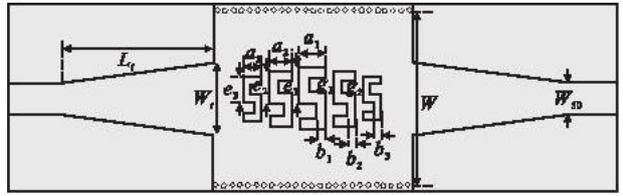


图4 滤波器的结构图

Fig.4 Structure of filter

基本吻合。所设计的带通滤波器与文献[8~10]中的带通滤波器相比较,带内回波损耗较优。表 4 为带内最小回波损耗的比较。

表4 带内最小回波损耗的比较

Tab.4 Comparison of the lowest return loss in passband

结构	带内最小回波损耗/dB
本文	25.10
文献[8]	11.00
文献[9]	10.87
文献[10]	15.00

同时可以看出,测试结果与仿真结果之间存在差异,尤其是插入损耗变大,这主要由于在测试过程中接入的转接头产生了一定损耗,由于转接头在手工焊接时很难掌握焊接精度,而所制作的滤波器的尺寸都是以 0.1 mm 的量级设计的,手工焊接是不可能达到这个精度,因此很难在仿真过程中考虑转接头损耗和加工误差。其次在加工过程中所使用的介质板介电常数不均匀以及加工过程中存在的误差,也会对测试结果产生一定的影响,而介质板介电常数不均匀是由生产厂家造成的,这个和加工过程中存在的误差一样,随机性和不确定性较强,因此也很难在仿真过程中加以考虑。最后由于构成基片集成波导侧壁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。



图5 带通滤波器实物图

Fig.5 The real object of bandpass filter

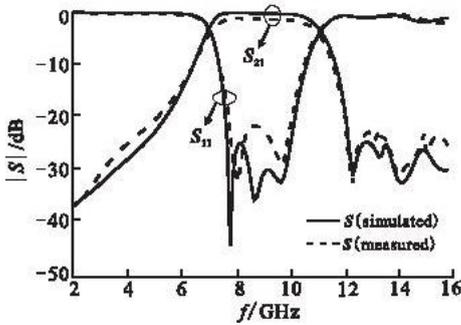


图6 仿真与测试结果

Fig.6 Simulated and measured of S-parameterr

### 3 结语

针对S形EBG结构在微波电路中的应用问题,本文提出了一种在SIW上表面蚀刻规则S形EBG结构的超宽带带通滤波器。在此结构中,S形EBG结构不仅有效的在SIW高通端引入带隙特性,而且使整个结构获得了超宽带的滤波器特性。对所提出的S形EBG结构超宽带带通滤波器的传输特性、相位、等效电路进行了分析,对所提出的滤波器进行了仿真和测量,测试结果表明,所设计的滤波器在回波损耗大于20 dB的通带带宽约为26.14%,这种带通滤波器结构紧凑,插入损耗小,同时,由于传输零点的存在,使得该结构滤波器具有较好的频率选择特性。测量结果与仿真结果基本吻合,在常规平面电路和器件设计方面具有潜在的应用价值。

### 参考文献(References):

[1] Lin S Y, Chow E, Hietala V, et al. Experimental demonstration of guiding and bending of electromagnetic waves in a photonic crystal[J]. Science, 1998, 282: 274-276.

[2] Radisic V, Qian Y, Coccioli R, et al. Novel 2-D photonic bandgap structure for microstrip lines [J]. IEEE microw guided wave lett, 1998, 8(2): 69-71.

[3] 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 microw theory tech, 2001, 49(1): 86-93.

[4] Caloz C, Okabe H, Iwai T, et al. A simple and accurate model for microstrip structures with slotted ground plane[J]. IEEE microw wireless compon lett, 2004, 14(4): 133-135.

[5] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. Physical review letters, 1987, 58(20): 2486-2489.

[6] Yan L, Hong W, Hua G, et al. Simulation and experiment on SIW slot array antennas [J]. IEEE microw wireless compon lett, 2004, 14(9): 446-448.

[7] Yan L, Hong W, Wu K, et al. Investigations on the propagation characteristics of SIW [J]. Microw antennas, 2005, 152(1): 35-42.

[8] 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.

[9] 陈世勇. 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.

CHEN Shiyong. Substrate integrated waveguide bandpass filter based on butterfly radial slot [J]. Journal of Chongqing university of technology, 2011, 34(6): 127-131. (in Chinese)

[10] 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, 33(6): 52-55.

TIAN Shulin. Bandpass filter of substrate integrated waveguide and band gap structure [J]. Journal of Chongqing university of technology, 2010, 33(6): 52-55. (in Chinese)

(编辑:田新华)