

# Ka 波段基片集成波导带通滤波器的设计

衣晓洋, 王 朗

(电子科技大学 物理电子学院, 四川 成都 610054)

**摘要:** 基片集成波导(SIW)是近年发展起来的一种新型微波传输结构。应用基片集成波导技术,通过实现耦合腔间的正负耦合,设计了应用于毫米波的交叉耦合滤波器。经三维电磁仿真,通带回波损耗大于 22 dB,最小插入损耗小于 1.5 dB。仿真结果表明该滤波器具有极高的实际应用价值。

**关键词:** 基片集成波导; 滤波器; 交叉耦合; 仿真

**中图分类号:** TN713

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-6236(2011)20-0145-03

## Design of Ka-band cross-coupled filter based substrate integrated waveguide

YI Xiao-yang, WANG Lang

(College of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** Substrate integrated waveguide (SIW) is developed in recent years as a new structure for microwave transmission. In this paper, by realizing the positive and negative coupling between two coupled cavities, a cross-coupled filter for millimeter wave application is designed based on SIW technology. The Simulation results confirmed the reflection of pass-band lower than 22 dB and insertion loss better than 1.5 dB.

**Key words:** substrate integrated waveguide; filter; cross-coupling; simulation

微波滤波器作为微波网络的关键器件,在微波毫米波通信、卫星通信、雷达等系统中都有着广泛的应用。传统微波滤波器一般采用波导型或微带型的结构形式。随着微波通信的发展,结构紧凑,高功率成为微波滤波器的发展方向。而传统波导型滤波器较大的体积和微带滤波器较大的辐射损耗都限制了其在当今微波系统中的应用。

基片集成波导(SIW)是近年发展起来的新型微波传输结构。由上下两层金属板和两侧两排金属圆柱包围介质片构成。其综合了传统波导和微带传输线的一系列优点:既有传统波导一样的高品质因数和小辐射损耗的优点,也具备微带线体积小,易集成<sup>[1]</sup>的优点。

设计了基于 SIW 的 4 阶交叉耦合滤波器。在设计中,交叉耦合滤波器的正负耦合结构由 SIW 谐振器实现,其中负耦合通过在两个 SIW 谐振器间加载带隙结构实现。利用 HFSS 仿真取得较好的结果。

## 1 SIW 结构设计

SIW 的结构设计包括 SIW 与微带转换结构的设计和 SIW 传输结构的设计。SIW 结构如图 1 所示。

图中, $a$  为 SIW 宽度, $p$  为金属柱间距, $d$  为金属柱直径。由于 SIW 的辐射损耗和反射损耗主要由金属通孔的直径和相邻金属孔之间的距离决定,为了尽量减小损耗,SIW 尺寸的一般设计原则是<sup>[2]</sup>:

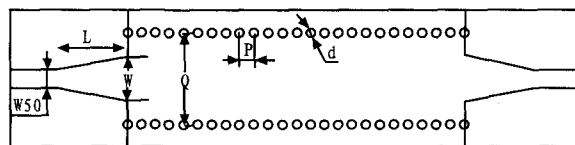


图 1 SIW 结构

Fig. 1 Structure of SIW

$$d < 0.2\lambda_g, d/a < 0.2, d/p \geq 0.5 \quad (1)$$

文献[3]分析了 SIW 的传输特性,并给出了它与介质填充波导间的等效关系:

$$a_{\text{eq}} = a - \frac{d^2}{0.95p} \quad (2)$$

SIW 主模截止频率为:

$$f_c = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon} a_{\text{eq}}} \quad (3)$$

综合(1)~(3)式,为满足滤波器传输频率的要求,取  $a=4 \text{ mm}$ ,  $d=0.3 \text{ mm}$ ,  $p=0.6 \text{ mm}$

虽然 SIW 有着卓越的性能,然而其独特的结构却难以测试和与其他器件连接。为解决这个问题,采用 SIW 与微带的转换结构使 SIW 端口变为微带端口,这样能很容易地进行测试和与其他器件连接。文中的转换结构采用一段微带渐变线,其一端与 50  $\Omega$  微带连接,另一端与 SIW 连接。设计中,使转换结构的两端阻抗分别与微带线阻抗和 SIW 阻抗匹配。由此计算得到转换结构两端尺寸,再通过 HFSS 以渐变线长度为变量仿真,以得到最佳传输效果时的尺寸。最终得出  $W=$

收稿日期:2011-08-25

稿件编号:201108091

作者简介:衣晓洋(1985—),女,黑龙江大庆人,硕士研究生。研究方向:微波无源器件与电真空器件。

1.9 mm,  $L=2.98$  mm,  $W/50=0.78$  mm。

## 2 滤波器设计

文中滤波器设计指标为中心频率 35 GHz, 带宽 1.6 GHz, 带外衰减大于 25 dB, 由设计要求需设置两个传输零点分别位于 33.5 GHz 和 36.5 GHz 处。由广义切比雪夫滤波器理论<sup>[4]</sup>, 根据以上设计指标确定滤波器的低通原型, 并综合出耦合矩阵如下:

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 1.1316 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.1316 & 0 & 0.9605 & 0 & -0.2890 & 0 \\ 0 & 0.9605 & 0 & 0.8660 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.8660 & 0 & 0.9605 & 0 \\ 0 & -0.2890 & 0 & 0.9605 & 0 & 1.1316 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.1316 & 0 \end{bmatrix}$$

实际滤波器的耦合系数与有载  $Q$  值可通过下式转换得出

$$K_{ij} = FBW \times M_{ij}, Q_e = 1 / (FBW \times M_{i1}^2) \quad (4)$$

其中  $FBW$  为滤波器的相对带宽,  $M_{ij}$  与  $M_{i1}$  为耦合矩阵对应低通原型耦合系数, 上述耦合矩阵对应的频率响应如图 2 所示。

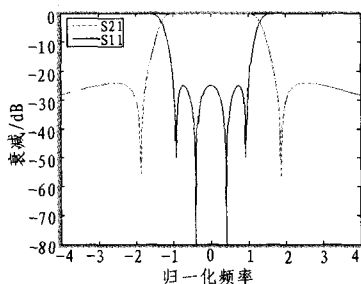


图2 滤波器频率响应

Fig. 2 Frequency responses of filter

### 2.1 滤波器腔体尺寸

SIW 腔体的谐振频率由下式决定<sup>[5]</sup>:

$$f_0 = \frac{c_0}{2\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\frac{1}{a_{eff}^2} + \frac{1}{l_{eff}^2}} \quad (5)$$

$$a_{eff} = a - \frac{d^2}{0.95p}; l_{eff} = l - \frac{d^2}{0.95p} \quad (6)$$

其中,  $a, l$  分别为 SIW 腔体的长度与宽度,  $c_0$  为光速,  $d$  和  $p$  分别为金属化通孔的直径与间距。根据滤波器中心频率指标, 可获得滤波器腔体尺寸。

### 2.2 外部耦合的实现

根据 John.B.Ness 的研究<sup>[6]</sup>, 滤波器端口群时延可由下式决定:

$$\Gamma = \frac{4Q_e}{\omega_0} \quad (7)$$

其中,  $Q_e$  为滤波器有载  $Q$  值可由公式(4)得出。由式(7)可将滤波器端口耦合系数的实现转为滤波器端口群时延的实现。在仿真软件中建立滤波器端口谐振腔的模型, 调节腔体耦合窗尺寸, 使其反射群时延值与上述计算群时延值  $\Gamma$  相等, 由此获得滤波器两端耦合窗的尺寸。

### 2.3 正耦合的实现

在仿真软件中建立双腔本征模仿真模型, 由耦合系数的定义, 在腔体耦合较弱的情况下, 耦合系数可按<sup>[3]</sup>:

$$k_{i,i+1} = 2 \times (f_2 - f_1) / (f_2 + f_1) \quad (8)$$

得出。其中  $f_1, f_2$  为双腔本征模仿真时第一个与第二个模式的频率值。据此式在仿真软件中设定输出变量  $k$ 。

扫描耦合窗宽度, 得出耦合系数随窗口尺寸大小变化的曲线如图 3 所示, 根据滤波器耦合系数值, 在图上查找对应数据即可获得耦合窗的大小。

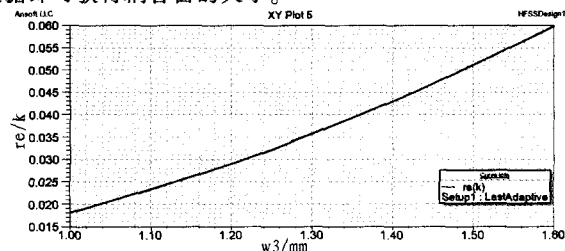


图3 腔间耦合系数随开口大小变化曲线

Fig. 3 Coupling coefficient between two proposed resonators as a function of width

### 2.4 负耦合的实现

负耦合的实现是交叉耦合滤波器设计的一个难点, 文中采用在 SIW 的上下金属薄片上加载带隙结构的方式, 这样虽然引入了一定的功率损失, 但易于加工, 且能很好实现设计要求。在 HFSS 中建立模型如图 4 所示。图中设定带隙开口宽度为 0.2 mm, 以开口长度为变量扫描。根据结果曲线即可得到实现负耦合的结构尺寸。



图4 负耦合结构

Fig. 4 Negative coupling structure

## 3 滤波器仿真研究

根据上述设计方法, 由综合出的耦合系数得到了滤波器的整体设计如图 5 所示, 其中基片材料为 RT/duroid 5880, 厚度 0.25 mm, 介电常数 2.2。滤波器设计图中各部分尺寸如表 1 所示。

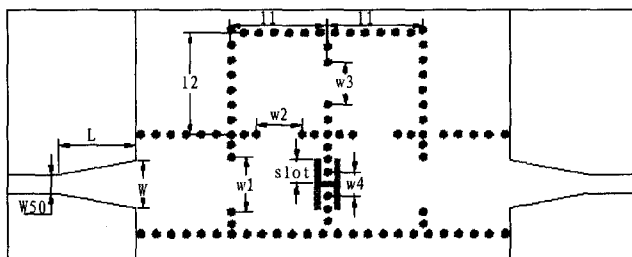


图5 SIW 交叉耦合滤波器整体结构

Fig. 5 Structure of SIW cross-coupled filter

表1 交叉耦合滤波器物理尺寸(mm)  
Tab. 1 Dimension of the cross-coupled filter(mm)

项目	尺寸	项目	尺寸
L1	3.84	L2	4.34
W1	2.62	W2	1.75
W3	1.7	W4	1.2
slot	1.04		

按照以上结构尺寸,用 HFSS 进行数值计算,得到交叉耦合带通滤波器的 S 参数曲线如图 6 所示。由仿真结果可看出,滤波器通带回波损耗大于 22 dB,最小插入损耗小于 1.5 dB,带外反射大于 20 dB,两传输零点分别位于 33.6 GHz 和 36.4 GHz 处。仿真结果与设计目标相比基本满足设计要求。

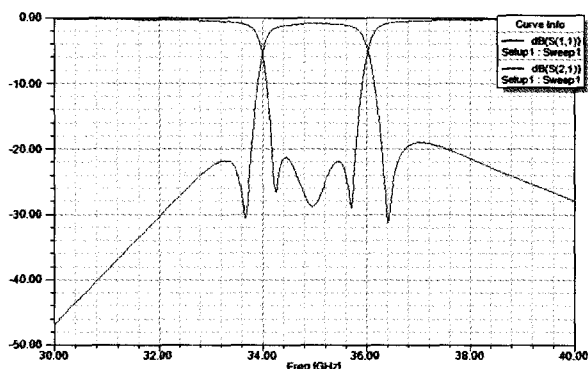


图6 滤波器仿真结果  
Fig. 6 Simulation result of SIW filter

## 4 结论

以 SIW 技术为基础设计了应用于 Ka 波段的交叉耦合波

波器。通过仿真软件仿真,得到了满足要求的设计结果。此滤波器相比传统滤波器设计,既能满足较小的辐射损耗,又能满足小型化的要求,在现今微波系统中有极高的应用价值。

### 参考文献:

- [1] Deslandes D, WU Ke. Single-substrate integration technique of planar circuits and waveguide filters [J]. IEEE Microwave Theory and Techniques, 2003, 51(2):593-96.
- [2] 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]. IEEE Proceedings: Microwaves, Antennas and Propagation, 2005, 152(1):35-42.
- [3] HONG Jia-sheng, LANCASTER M J. Microstrip filter for RF/microwave applications[J]. Microwave Magazine, 2001, 3(3): 62-65.
- [4] ATIA A E, WILLIAMS A E. Narrow-bandpass waveguide filters [J]. IEEE Microwave Theory and Techniques, 1972, 20(4):258-265.
- [5] Cassivi Y, Perregrini L, Arcioni P, et al. Dispersion characteristics of substrate integrated rectangular waveguide[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2002, 12(9): 333-335.
- [6] Ness J B. A unified approach to the design measurement and tuning of Coupled-Resonator filters[J]. IEEE Microwave Theory and Techniques, 1998, 46(4):343-351.

## IDT 推出全球最高性能的 Gen 3 PCI Express 交换器件 用于 SSD 存储阵列和云计算应用

IDT 公司(Integrated Device Technology)发布全球最高性能的 Gen 3 PCI Express(PCIe)交换芯片系列,用于固态硬盘(SSD)存储阵列和云计算应用。新的交换芯片系列以占据领导地位 of IDT 高性能、可升级的 PCIe Gen 1 和 Gen 2 交换芯片为基础,支持多达 64 通道和 16 端口的容量,并支持更多协议,以改善效率和降低功耗。

IDT 89H64H16G3 是一款 64 通道、16 端口的 Gen 3 PCIe 交换芯片,每秒(GBps)交换能力达到业界最高的 128 Gigabytes,是目前市场上最易升级和最高性能的单芯片 Gen 3 PCI Express 解决方案。该新器件符合最新的 Gen3 PCIe 规格,可提供 8Gbps 的链路速度,可为新一代企业服务器和存储系统应用提供可实现的最快速 PCIe 连接。Gen 3 协议的增强改善了整体效率并为功耗敏感的企业和云计算数据中心降低了功耗。这些器件数月前就已经向 IDT 的意向客户提供样品。

新系列的 IDT 交换器件还内置了时钟隔离,具有独立扩频时钟(SSC)独立运行的能力,并能实现性能显著提升的多播功能。此外,该交换芯片还集成了多主分区功能,有利于设计人员用单个解决方案代替多个 PCIe 交换芯片而降低系统成本。

咨询编号:2011201014

欢迎订阅 2012 年度《电子设计工程》(半月刊)

国内邮发代号:52-142

国际发行代号:M2996

订价:15.00 元/期 360.00 元/年

## 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, 致力和专注于微波、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/>