

## 硅基参数对微带带通滤波器传输特性的影响

闫军喜, 张淑莉, 彭玉峰

(河南师范大学 物理与信息工程学院, 河南 新乡 453007)

**摘要:** 随着半导体工艺技术和 IC 设计技术的飞速发展, 硅基滤波器技术也不断更新换代。滤波器传输性能取决于基片介电常数、损耗和厚度等参数。研究了硅基不同厚度、损耗以及掺杂浓度等情况下, 中心频率为 5.75 GHz 附近的平行耦合微带带通滤波器的传输系数和反射系数的频率响应特性。结果表明: 当微带线带通滤波器 PCB 版图确定时, 滤波器正向传输系数  $S_{21}$  随着基片材料厚度的减小, 通频带宽变窄; 随着硅掺杂浓度的增加, 通带向低频方向偏移; 当正切损耗为 0.000 4, 0.004 和 0.04 时, 中心频率处  $S_{21}$  分别为 -14.18, -2.08 和 -0.81 dB。理论结果与实验数据进行比较, 两者符合较好。

**关键词:** 微带滤波器; 耦合微带线; 传输系数; 介质参数; 硅基滤波器

**中图分类号:** TN713.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-353X (2012) 01-0047-04

## Influence of Silicon Substrate Parameters on Transmission Characteristics of Microstrip Bandpass Filters

Yan Junxi, Zhang Shuli, Peng Yufeng

(College of Physics and Information Engineering, Henan Normal University, Xinxian 453007, China)

**Abstract:** With the development of the semiconductor process technology and IC design technology, the silicon-based filter technology is continuously improved. The filter's transmission characteristics depend on the dielectric constant, dielectric loss and substrate thickness. The frequency response characteristics of the transmission coefficient and reflection coefficient of the parallel coupled microstrip bandpass filter were researched, in the condition of silicon-based with different thickness, loss and doped concentration, when the center frequency was 5.75 GHz. The results show that when the PCB layout of the microstrip line band-pass filter was fixed, the passband bandwidth was narrowed with the decrease of the substrate thickness. The central frequency of the passband was shifted to the low frequency with the increase of the doped concentration. When the tangent loss are 0.000 4, 0.004 and 0.04, the peak values of  $S_{21}$  at the center frequency are -14.18, -2.08 and -0.81 dB, respectively. The filter was fabricated, and the theoretical results are basically coincident with the experimental.

**Key words:** microstrip filter; coupled microstrip line; transmission coefficient; dielectric parameter; silicon-based filter

**EEACC:** 1270

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (61077037); 河南省基础与前沿技术研究计划 (102300413214)

**通信作者:** 彭玉峰, E-mail: yufengp@sina.com

## 0 引言

带通滤波器是滤波器中使用最多, 也是最难设计的一种滤波器。作为一种体积小、重量轻和可靠性高的微波集成电路 (MIC) 单元, 微带带通滤波器<sup>[1-2]</sup>在电子系统尤其是通信领域被广泛应用。

近年来微带带通滤波器技术发展迅速。J. T. Kuo 等人<sup>[3]</sup>分别在型号为 RT/duroid 6010 和 RT/duroid 5880 聚四氟乙烯及陶瓷介质基片上, 利用三线耦合微带结构数值仿真了对称式三线耦合微带带通滤波器, 讨论分析了带通滤波器的传输特性; K. T. Chan 等人<sup>[4]</sup>在质子注入硅基片上制备了 40 GHz 共平面波导带通滤波器, 取得了较好的滤波效果; S. Y. Lee 等人<sup>[5]</sup>通过在 MgO 基片上镀制 YBCO 超导薄膜, 研究了 12 GHz 三线耦合微带结构窄带带通滤波器; V. K. Velidi 等人<sup>[6]</sup>研究了基于环氧树脂基片的 2.4 GHz 多传输零点微带带通滤波器。周春霞等人<sup>[7]</sup>利用全波仿真软件, 在 0.5 mm 厚 MgO 基片的高温超导薄膜上对 12 阶双通带自均衡高温超导薄膜微带滤波器进行了仿真分析。

微带滤波器实际电路是由实际电路板和微带线两部分构成, 实际电路的性能可能会与原理图仿真的结果有很大的差异。其中, 实际基片参数与仿真参数的差异, 尤其是基片正切损耗以及介电常数等物理参数与设计仿真数值的偏离, 这些差异将严重影响微带滤波器的传输性能。

半导体硅是集成电路、微电子技术广泛采用的基底材料。本文以 n 型半导体硅作为基片, 分析基片厚度、正切损耗和掺杂浓度等对平行耦合微带带通滤波器的传输系数、通频带宽比和反射系数的影响, 并与实验结果进行了比较。

## 1 滤波器设计原理

滤波器按照其选频特性主要分为三种类型, 即低通、高通和带通。而实际滤波器在设计时都事先确定一个低通原型, 然后经过频率和元件值变换而得到需要综合的滤波器元件值。滤波器的特性是用频率响应来描述的, 一般采用工作衰减  $L_A$  来描述滤波器的幅值特性, 即

$$L_A = 10 \lg \frac{P_{in}}{P_L} \quad (\text{单位 dB}) \quad (1)$$

式中  $P_{in}$  和  $P_L$  分别为输出端接匹配负载时滤波器输入功率和负载吸收功率。

图 1 为微带带通滤波器的结构示意图。微带线的宽度为  $W$ , 两微带线间距为  $S$ , 介质基片厚度为  $h$ , Cu 箔厚度为  $t$ , 微带线长度为  $L$ 。带通滤波器指标的描述:  $\omega_{c1}$  和  $\omega_{c2}$  为通带截止频率;  $\omega_0$  为通带中心频率,  $\omega_0 = \sqrt{\omega_{c1}\omega_{c2}}$ ;  $BW$  为相对带宽,  $BW = (\omega_{c2} - \omega_{c1}) / \omega_0$ 。



图 1 微带线带通滤波器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram for a microstrip bandpass filter

通过下列频率变换可以由低通得到带通

$$\omega' = 1/BW (\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega) \quad (2)$$

由低通原型参数和相对带宽确定带通滤波电路耦合传输线奇模和偶模的特性阻抗

$$J_{01}/Y_0 = \sqrt{\pi BW/2g_0g_1} \quad (3)$$

$$J_{n,n+1}/Y_0 = \sqrt{\pi BW/2g_ng_{n+1}} \quad (4)$$

$$J_{i,i+1}/Y_0 = \pi BW/2\sqrt{g_ig_{i+1}} \quad (i \text{ 为 } 1 \sim n-1) \quad (5)$$

$$(Z_{oe})_{i,i+1} = [1 + J_{i,i+1}/Y_0 + (J_{i,i+1}/Y_0)^2] / Y_0 \quad (6)$$

$$(Z_{oo})_{i,i+1} = [1 - J_{i,i+1}/Y_0 + (J_{i,i+1}/Y_0)^2] / Y_0 \quad (7)$$

式中:  $g_i$  为低通原型滤波器参量;  $Y_0$  为传输线特性导纳;  $(Z_{oe})_{i,i+1}$  为耦合微带线的偶模特性阻抗;  $(Z_{oo})_{i,i+1}$  为耦合微带线的奇模特性阻抗。根据计算出来的微带线的奇模和偶模特性阻抗, 可使用 ADS 软件中的 LineCalc 计算出耦合微带线的几何尺寸  $W$ ,  $S$  和  $L$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 单晶硅基片滤波特性

选择硅基片厚度  $h$  为 0.8 mm, 介电常数  $\epsilon_r$  为 11.9, 正切损耗角  $\tan \delta = 0.0004$ ; 微带线 Cu 箔厚



度  $t$  为  $0.03 \text{ mm}$ , 电导率为  $5.988 \times 10^7 \text{ S/m}$ 。设计指标包括: 通带  $5.50 \sim 6.00 \text{ GHz}$ , 带内衰减  $2 \text{ dB}$ , 带内起伏小于  $1 \text{ dB}$ , 中心频率为  $5.75 \text{ GHz}$ , 在小于  $5.3 \text{ GHz}$  及大于  $6.2 \text{ GHz}$  时其衰减量大于  $30 \text{ dB}$ 。由公式

$$\frac{\omega'}{\omega'_1} = \frac{1}{W} \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) = 2 \quad (8)$$

采用切比雪夫低通原型滤波器模型进行 5 阶设计。查参数表可得低通原型参数  $g$  的数值。对于波纹为  $0.5 \text{ dB}$  的 5 阶切比雪夫滤波器, 低通原型元件值分别为:  $g_0 = 1$ ,  $g_1 = 1.7058$ ,  $g_2 = 1.2296$ ,  $g_3 = 2.5408$ ,  $g_4 = 1.2296$ ,  $g_5 = 1.7058$ ,  $g_6 = 1$ 。根据滤波器设计指标, 可以确定滤波器的归一化带宽为

$$BW = (\omega_{c2} - \omega_{c1}) / \omega_0 = |5.50 - 6.00| \text{ GHz} / 5.75 \text{ GHz} = 0.087 \quad (9)$$

由式 (6) 和 (7) 可计算出每段微带奇模和偶模特性阻抗值, 如表 1 所示。

表 1 传输线的奇模和偶模特性阻抗值

$i$	$(Z_{oe})_{i,i+1} / \Omega$	$(Z_{oo})_{i,i+1} / \Omega$
0	108.305 0	39.305 0
1	93.680 0	37.680 0
2	83.580 0	37.580 0
3	83.580 0	37.580 0
4	93.680 0	37.680 0
5	108.305 0	39.305 0

根据每个奇模特性阻抗和偶模特性阻抗可以换算成微带线的实际尺寸, 又考虑微波板基片材料的介电常数及厚度等指标, 因此可以得到微带线的实际宽度和间距, 每一段的耦合微带线长均为  $\lambda/4$ 。当  $n$  为奇数时, 低通原型滤波器参数是对称的, 微带线带通滤波器 PCB 版图如图 2 所示。相应的微带线宽度和线长分别为  $W = 0.6157 \text{ mm}$ ,  $L = 4.4590 \text{ mm}$ ,  $W_1 = W_6 = 0.4786 \text{ mm}$ ,  $W_2 = W_5 = 0.5795 \text{ mm}$ ,  $W_3 = W_4 = 0.5825 \text{ mm}$ ,  $S_1 = S_6 = 0.4560 \text{ mm}$ ,  $S_2 = S_5 = 1.3312 \text{ mm}$ ,  $S_3 = S_4 = 1.5319 \text{ mm}$ ,  $L_1 = L_6 = 4.7756 \text{ mm}$ ,  $L_2 = L_5 = 4.6599 \text{ mm}$ ,  $L_3 = L_4 = 4.6539 \text{ mm}$

若端口 2 匹配时端口 1 的反射系数用  $S_{11}$  表示, 端口 1 匹配时端口 2 的反射系数为  $S_{22}$ , 端口 1 匹配时端口 2 到端口 1 的反向传输系数为  $S_{12}$ , 端口 2 匹配时端口 1 到端口 2 的正向传输系数为  $S_{21}$ , 利用 ADS2008 仿真软件按照图 2 所示结构进行仿真, 可得  $S_{21}$  及  $S_{11}$ 。

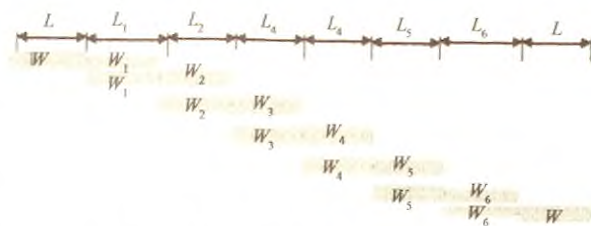


图 2 微带线带通滤波器 PCB 版图  
Fig. 2 PCB layout for the microstrip bandpass filter

图 3 表示中心频率为  $5.75 \text{ GHz}$ , Si 基片厚度为  $0.8 \text{ mm}$  时正向传输系数  $S_{21}$  和反射系数  $S_{11}$  的频率响应特性。图 4 给出了中心频率为  $5.75 \text{ GHz}$ , 硅基片厚度为  $0.8 \text{ mm}$  时正向传输系数  $S_{21}$  和反射系数  $S_{11}$  的相频响应特性。

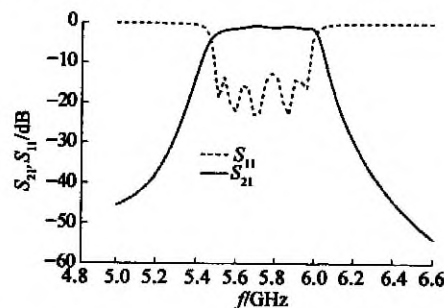


图 3 正向传输系数  $S_{21}$  和反射系数  $S_{11}$  幅频响应特性  
Fig. 3 Amplitude-frequency characteristics of  $S_{21}$  and  $S_{11}$

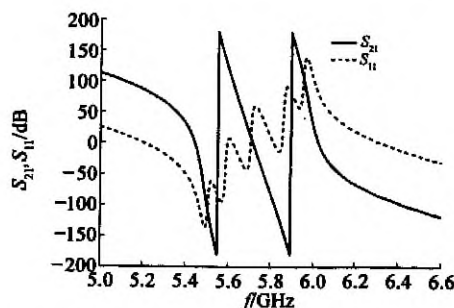


图 4 正向传输系数  $S_{21}$  和反射系数  $S_{11}$  相频响应特性  
Fig. 4 Phase-frequency characteristics of  $S_{21}$  and  $S_{11}$

当微带线带通滤波器 PCB 版图确定, 改变基片材料的厚度, 可以得到不同厚度情况下的正向传

输系数  $S_{21}$  的频率响应特性, 如图 5 所示。当基片材料的正切损耗发生改变时, 正向传输系数  $S_{21}$  的幅频响应特性如图 6 所示。

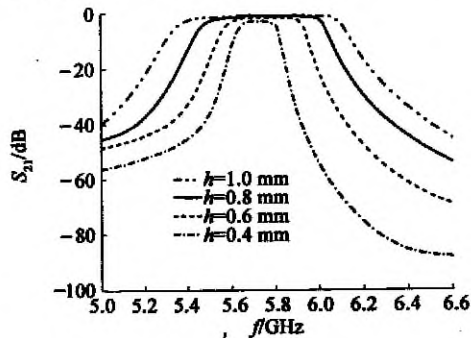


图 5 不同基片厚度下  $S_{21}$  幅频响应特性  
Fig. 5 Frequency characteristics of  $S_{21}$  for different substrate thickness

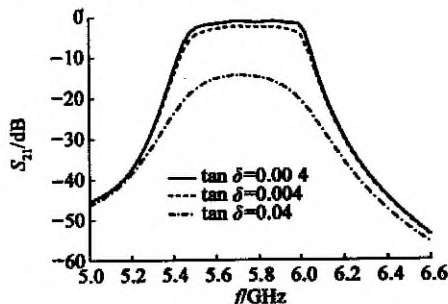


图 6 基片不同正切损耗情况下  $S_{21}$  幅频响应特性  
Fig. 6 Frequency characteristics of  $S_{21}$  for different tangent loss of the substrate

## 2.2 掺杂 n 型 Si 基片滤波特性

在 n 型半导体中, 自由电子为多子, 空穴为少子, 主要靠自由电子导电。自由电子主要由杂质原子提供, 空穴由热激发形成。掺入的杂质越多, 多子 (自由电子) 的浓度就越高, 导电性能就越强, 其介电常数  $\epsilon_s(N_D)$  可表示为<sup>[8]</sup>

$$\epsilon_s(N_D) = 11.688 + \frac{1.635 \times 10^{-19} N_D}{1 + 1.172 \times 10^{-21} N_D} \quad (10)$$

式中  $N_D$  表示掺杂浓度。当  $N_D = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  时,  $\epsilon_s(N_D) = 11.851$ ; 当  $N_D = 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  时,  $\epsilon_s(N_D) = 13.295$ ; 当  $N_D = 1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  时,  $\epsilon_s(N_D) = 25.851$ 。

现将这几种不同掺杂浓度硅的介电常数, 在以硅为基片、厚度为 0.8 mm 的 PCB 版图上进行仿真, 如图 7 所示。随着掺杂浓度的增加, 通带向低频方向偏移, 即中心频率随着半导体硅掺杂浓度的增加而不断减小。

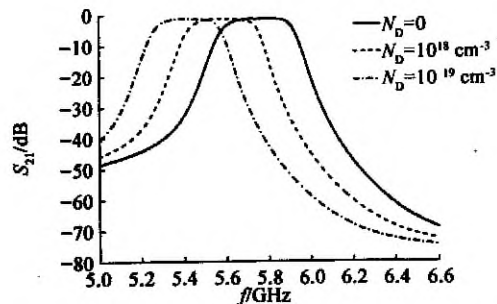


图 7 不同掺杂浓度硅基片传输系数  $S_{21}$  幅频特性  
Fig. 7 Frequency characteristics of  $S_{21}$  for different doped concentration of the silicon substrate

## 3 滤波器制作

选择单晶硅 (100) 基片, 双面抛光, 其厚度  $h$  为 0.8 mm, 面积为  $40 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 。经过超声清洗处理后, 放入超高真空射频磁控溅射镀膜系统 (本底真空为  $2.5 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ , 溅射氩气压为  $2.8 \times 10^{-1} \text{ Pa}$ , 阴极靶电压为 600 V, 靶电流为 500 mA), 进行 Cu 膜大厚度沉积。改变溅射镀膜时间, 达到 Cu 膜厚度  $t$  为 0.03 mm 为止。采用 PCB 电路板雕刻机进行微带线滤波器雕刻, 如图 8 所示。正向传输系数  $S_{21}$  和反射系数  $S_{11}$  幅频响应特性如图 9 所示。



图 8 硅基微带滤波器 PCB 电路板雕刻图  
Fig. 8 PCB fabrication of silicon-based microstrip filter

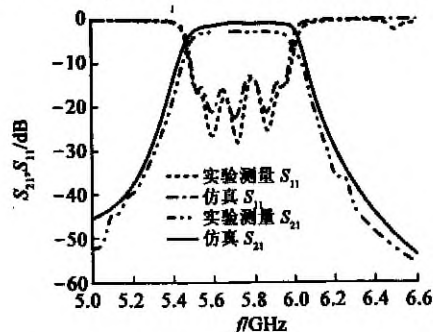


图 9 正向传输系数  $S_{21}$  和反射系数  $S_{11}$  幅频响应特性  
实验与理论结果比较

Fig. 9 Comparison of theoretical and experimental amplitude-frequency characteristics of  $S_{21}$  and  $S_{11}$

(下转第 67 页)



- [4] KANDASAMY R, MUJUMDAR A S. Thermal analysis of a chip ceramic ball grid (CBGA) package [J]. Microelectronics Reliability, 2008, 48: 261 - 271.
- [5] CHEN K M, HOUNG K H, CHIANG K N. Thermal resistance analysis and validation of flip chip PBGA packages [J]. Microelectronics Reliability, 2006, 46: 440 - 448.

(收稿日期: 2011-08-09)

#### 作者简介:

杨少柒(1988—), 男, 武汉人, 研究生, 研究方向为 电子封装热模型;



谢秀娟(1979—), 女, 武汉人, 副研究员, 主要从事电子封装热模型和热管理研究。

(上接第 50 页)

正向传输系数  $S_{21}$  的测试指标为: 通带为 5.51 ~ 5.96 GHz, 带内衰减 3 dB, 带内起伏小于 1 dB, 中心频率为 5.73 GHz; 在 5.3 GHz 以下以及 6.17 GHz 以上时, 其衰减大于 30 dB。测试指标与设计值相比基本吻合。

## 4 结语

在微波、毫米波电路设计中, 一般采用具有较高相对介电常数的基片材料, 并且随着频率的增加, 基片厚度要求越来越薄; 在 PCB 版图一定的情况下, 改变基片厚度, 带通滤波器的带宽则随着厚度的减小而逐渐变窄, 微带带通滤波器的带内损耗则随着损耗角正切值的增大也随之增大; 在用硅做基片时, 随着硅中掺杂浓度的增加, 带通滤波器的中心频率不断变小。

#### 参考文献:

- [1] MANDAL M K, SANYAL S. Design of wide-band, sharp-rejection bandpass filters with parallel-coupled lines [J]. IEEE Microw Wireless Compon Lett, 2006, 16 (11): 597 - 599.
- [2] HSIEH L H, CHANG K. Compact, low insertion loss, sharp rejection and wideband microstrip bandpass filters [J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2003, 51 (4): 1241 - 1246.
- [3] KUO J T, SHIH E. Wideband bandpass filter design with three-line microstrip structures [J]. Proc Inst Elect Eng, 2002, 149 (56): 243 - 247.
- [4] CHAN K T, CHEN C Y, HSIEH J C, et al. 40 GHz coplanar waveguide bandpass filters on silicon substrate [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2002, 12 (11): 429 - 431.

- [5] LEE S Y, KIM S M, YOON H K, et al. Superconducting bandpass filter using parallel microstrip line with narrow bandwidth centered at 14 GHz [J]. Applied Surface Science, 2000, 154/155: 478 - 481.
- [6] VELIDI V K, SANYAL S. Sharp-rejection microstrip bandpass filters with multiple transmission zeros [J]. International Journal of Electronics and Communications, 2010, 64 (12): 1173 - 1177.
- [7] 周春霞, 夏侯海, 左涛, 等. 自均衡双通带微带滤波器综合与设计 [J]. 电子学报, 2009, 37 (12): 2783 - 2786.
- [8] RISTI Ć S, PRIJI Ć A, PRIJI Ć Z. Dependence of static dielectric constant of silicon on resistivity at room temperature [J]. Serbian Journal of Electrical Engineering, 2004, 1 (2): 237 - 247.

(收稿日期: 2011-06-20)

#### 作者简介:

闫军喜(1964—), 男, 河南夏邑人, 高级讲师, 研究方向为计算机仿真技术, 一直从事计算物理、数值分析与模拟等领域的研究工作;



彭玉峰(1963—), 男, 河南夏邑人, 教授, 博士, 研究方向为微波与光电子技术, 现主要从事窄带滤波器、光电子器件等领域的研究工作。

## 更正

2011 年 12 期中文目次页中“1.2 V 低功耗时钟发生器设计”一文的第二作者应为俞惠月, 特此更正! 由于编辑的疏忽给作者带来了不便, 在此表示深深的歉意!

## 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/>