文章编号：2095-4980(2016)03-0344-04

微屏蔽三线对称结构带通滤波器设计

黄裕霖，鲍景富，邓　迪

(电子科技大学 电子工程学院，四川 成都 611731)

摘　要： 对薄膜支撑空腔型微屏蔽传输线进行分析，提出微屏蔽传输线的物理结构。为了验证微屏蔽传输线在毫米波应用的优势，利用类比平行耦合微带线滤波器的方法设计了一种4阶切比雪夫三线对称结构微屏蔽线滤波器。通过对该微屏蔽腔体结构进行HFSS仿真，得到中心频率35 GHz的宽带滤波器，带宽15 GHz，带内插损小于0.5 dB，带外抑制>40 dB@53 GHz，器件尺寸8.24 mm×1.5 mm×0.65 mm。该设计为基于平面传输线的滤波器在毫米波频段的实现提供了一种可行的方法。

关键词： 微屏蔽传输线；三线对称；宽带滤波器

中图分类号：TN713^{+}.5　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.11805/TKYDA201603.0344

Design of a passband filter based on three symmetric microshield transmission lines

HUANG Yulin, BAO Jingfu, DENG Di

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: The film supported cavity microshield transmission line is analyzed and its physical structure is given out. In order to verify the superiority of microshield transmission line in millimeter wave application, parallel-coupled microstrip line method is adopted to design a 4th order Chebyshev filter with the three-symmetrical-line structure. The proposed microshield cavity structure is simulated with HFSS, achieving a broadband filter with center frequency of 35 GHz, bandwidth 15 GHz, band insertion loss below 0.5 dB and band rejection>40 dB@53 GHz. The device has a size of 8.24 mm×1.5 mm×0.65 mm. This design provides a possible method for implementing filters based on plain transmission line in millimeter band.

Key words: microshield transmission line; Three-symmetric-line; wideband filter

传统的平面传输线结构如微带线、共面波导、带状线、槽线等在低频段电路系统中有较好的性能，可以实现信号低损耗弱色散的传输。然而在微波毫米波频段电路乃至毫米波系统中，传统传输线的损耗和色散将是限制器件性能的一个重要的因素[1]。虽然在毫米波电路中，槽线和波导的损耗都相对较小，但其体积庞大且笨重，不利于系统集成，因此也不能作为毫米波和太赫兹器件推广的传输线结构。因此提出一种新型低损耗的平面传输线结构，将有利于毫米波和太赫兹器件技术在各个领域的实际应用，推动高频段信息科学技术领域的发展[2-4]。本文针对薄膜支撑空腔型微屏蔽传输线的传输特性进行了数值分析，得到传输线等效电容与结构尺寸的关系。为了验证微屏蔽传输线在毫米波应用的优势，本文利用不连续性结构设计了基于微屏蔽结构的宽带毫米波滤波器。

1　微屏蔽线传输特性分析

微屏蔽传输线是一种基于微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System，MEMS)工艺的类共面波导结构，通过体硅工艺将传统共面波导下方刻蚀成空气腔，可显著减小传输线工作过程中衬底带来的介质损耗。其基本结构见图 1，包括信号线、介质支撑薄膜、地平面、金属化内壁以及硅基底，其中金属化内壁和地平面连通，与信号线构成双线结构，可传播准横向电磁场(Transverse Electric and Magnetic Field，TEM)波。由于微屏蔽传输线结构其信号线上下都为均匀介质分布(都为空气)，避免了传统基底支撑的传输线结构基底与空气之间相对介电常数的

收稿日期：2014-11-27；**修回日期：**2015-03-05

基金项目：国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合基金资助项目(U1430102)

突变，从而杜绝了相对介电常数突变带来的电场不均匀分布。

在分析微屏蔽线传输特性时，由于其工作在准 TEM 的传输模式，因此当给定了传输线单位长度的电容时，利用保角变换法可计算其特征阻抗[5-7]。

微屏蔽传输线的结构可简化为图 2，在模型中忽略了介质薄膜的厚度以及金属传输线厚度，2a 代表传输线的信号线的宽度，2b 代表两边地平面之间的宽度，b–a 即为传输线信号线两边槽孔的宽度，h 代表介质被挖空的腔体的高度，L 代表腔体的宽度，2c 代表整个传输线两边地平面的宽度。

传输线单位长度的总电容值 C_t 为上半平面空气域的电容值 C_a 和下半平面包含矩形腔的电容值 C_{CR} 的总和：

$$C_t = C_a + C_{CR} = 2\varepsilon_0 \frac{K(k)}{K(k')} + 2\varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{K(t_a/t_b)}{K'(t_a/t_c)} \tag{1}$$

式中：t_a,t_b,t_c 分别为经过 Schwartz-Christoffel 保角变换后的 a,b,c 的长度；ε_0 为真空介电常数；ε_r 为介质相对介电常数；$K(k)$为一阶完全椭圆积分。。

$$k = \frac{c}{b}\sqrt{\frac{b^2-a^2}{c^2-a^2}}\ ,\ k' = \sqrt{1-k^2} \tag{2}$$

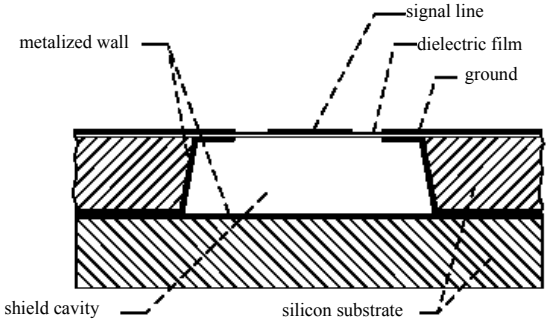

Fig.1 Basic structure of the microshield transmission line
图 1 微屏蔽传输线结构

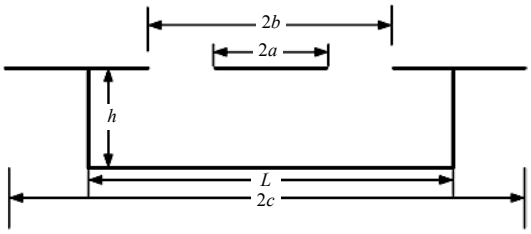

Fig.2 Simplified model of the microshield transmission line
图 2 微屏蔽传输线的简化模型

2　滤波器设计仿真

介于微屏蔽传输线在毫米波段具有低损耗、高 Q 值的特性，通过其设计的毫米波滤波器散射特性也具有插损低、带外抑制高的特点。采用微波工程中通用的耦合线带通滤波器设计方法[8]，同时考虑制备工艺条件限制[9]，设计了一种 N=3 和 0.5 dB 等纹波响应的毫米波带通滤波器，中心频率为 35 GHz，带宽为 15 GHz。滤波器结构以高阻硅为基底(相对介电常数=11.9)，微屏蔽传输线的腔体深度为 250 μm，腔的宽度为 1 500 μm，整个硅基的高度为 400 μm。

由相对带宽 $\Delta = \dfrac{15\,\text{GHz}}{35\,\text{GHz}} = 0.43$，代入具有 N+1 个耦合线段的带通滤波器变换式：

$$Z_0 J_1 = \sqrt{\frac{\pi\Delta}{2g_1}}\ ,\ Z_0 J_n = \frac{\pi\Delta}{2\sqrt{g_{n-1}g_n}}\ ,\ Z_0 J_{N+1} = \sqrt{\frac{\pi\Delta}{2g_N g_{N+1}}}\ ,\ n = 2,3,\cdots,N \tag{3}$$

式中：Z_0 为传输线的特征阻抗；g_n 为切比雪夫低通原型的原件值；J_n 为中间变量。得到 J_1 到 J_4 的值，见表 1，再将其代入奇模偶模阻抗计算公式：

$$Z_{0e} = Z_0\left[1 + JZ_0 + (JZ_0)^2\right]\ ,\ Z_{0o} = Z_0\left[1 - JZ_0 + (JZ_0)^2\right] \tag{4}$$

式中：Z_{0e} 为偶模阻抗；Z_{0o} 为奇模阻抗。可得屏蔽传输线第 1 段到第 4 段的奇模阻抗和偶模阻抗，又因为微屏蔽线的上下介质都为空气，介电常数趋于 1，所以可进一步得到奇模电容和偶模电容 $C = \dfrac{1}{c \cdot Z}$，见表 1，c 为真空中的光速。

图 3 中 C_{12} 为 2 个带状导体之间的耦合电容，C_{11} 和 C_{22} 分别为每个带状导体和地之间的电容。若采用对称耦合方式，则有：

$$C_{11} = C_{22}, C_e = \frac{C_{11} + 2C_{22}}{2}, C_o = \frac{C_{11} + 2C_{22} + 4C_{12}}{2} = C_e + 2C_{12} \tag{5}$$

式中：C_e 代表偶模电容，C_o 代表奇模电容。本文中耦合方式采用对称三线耦合结构。这里假设两边传输线的电容值与中心传输线电容值相等以使传输线尺寸更宽，增加相互间的耦合度。将 C_e 与 C_o 的值代入式(5)，可得 C_{11},C_{22} 与 C_{12} 的值，见表 1。

表 1 30 GHz 微屏蔽线滤波器原型参数值
Table1 Parameters of the 30 GHz microshield transmission line filter

n	1	2	3	4
J	0.013 0	0.010 2	0.010 2	0.013 0
Z_{0e}/Ω	103.560	88.383	88.383	103.560
Z_{0o}/Ω	38.616	37.504	37.504	38.616
C_e/pF	31.766	36.913	36.913	31.766
C_o/pF	85.908	88.798	88.798	85.908
C_{11},C_{22}/pF	21.459	25.143	25.143	21.459
C_{12}/pF	27.066	25.583	25.583	27.066

通过保角变换，可计算图 4 中导体之间的电容值。这里分别计算中心传输线与两侧传输线对地以及它们互相之间的电容值，中心传输线与地之间的电容值为 C_{11}，两侧每一边传输线与地之间的电容值为 $C_{22}/2$，中心传输线与两侧每一边传输线之间的电容值为 C_{12}。

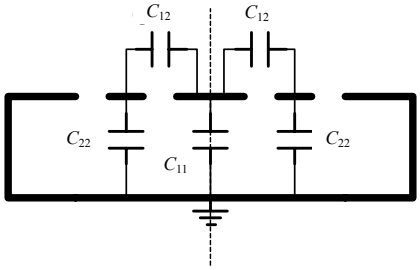

Fig.3 Equivalent capacitance calculation of the microshield transmission line
图 3 微屏蔽传输线电容等效计算

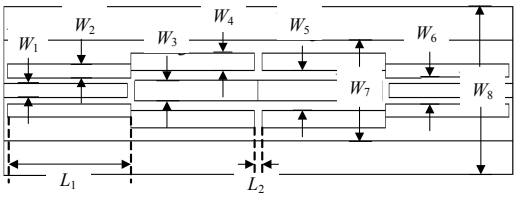

Fig.4 Vertical view of the filter structures and sizes
图 4 滤波器尺寸结构俯视图

由四分之一波长的谐振器组成了宽带滤波器结构见图 4。通过调节各传输线的尺寸位置使保角变换得到的电容值与设计值相等，得到带通滤波器的结构参数，见表 2。

将图 4 所示的带通滤波器结构在全波分析工具 HFSS 中进行仿真分析，基底采用 Si 材料，厚度为 400 μm，空腔深度为 250 μm，其余部分设为理想导体。得到滤波器的插损和回波损耗结果见图 5。

表 2 带通滤波器的结构参数
Table2 Parameters of the bandpass filter structure

W_1/μm	W_2/μm	W_3/μm	W_4/μm	W_5/μm	W_6/μm	W_7/μm	W_8/μm	L_1/μm	L_2/μm
126	121	180	157	356	234	900	1 500	2 000	120

由仿真结果可以看出，仿真设计的带通滤波器的中心频率为 35 GHz，带宽 15 GHz，为宽带带通滤波器结构。仿真结果中滤波器的带内插损小于 0.5 dB，且具有较宽的应用频率范围。在阻带频率 53 GHz 处带外抑制接近 40 dB，带外的第 1 个零点出现在 56 GHz。

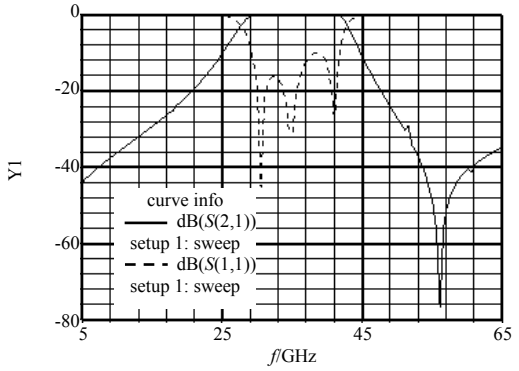

Fig.5 Simulation results of the 35 GHz wideband filter
图 5 35 GHz 宽带滤波器仿真结果

3 结论

本设计采用三线对称结构微屏蔽传输线，构造出中心频率为 35 GHz 的宽带滤波器。由 HFSS 仿真得到，滤波器具有< 0.5 dB 的带内插损，>40 dB@53 GHz 的带外抑制，整体体积 8.24 mm × 1.5 mm × 0.65 mm，可广泛应用于通信系统、雷达阵列等领域。

参考文献：

[1] 钟任斌. 太赫兹传输线研究[D]. 成都:电子科技大学, 2012. (ZHONG Renbin. Study of terahertz transmission line[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2012.)

[2] 陈会. 基于耦合传输线结构的新型微波器件研究与设计[D]. 成都:电子科技大学, 2008. (CHEN Hui. Study and design of new microwave devices based on coupling transmission line structure[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2008.)

[3] 周明祺. 高性能小型化平面微波滤波器研究[D]. 成都:电子科技大学, 2010. (ZHOU Mingqi. Study of high performance minimized planar microwave filter[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2010.)

[4] WELLER T M,KATEHI L P,REBEIZ G M. A 250 GHz microshield bandpass filter[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1995,5(5):153-155.

[5] 王新稳. 复解析保角变换在电磁工程中的应用研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2011. (WANG Xinwen. Study and application of complex analytic conformal transformation in electromagnetic engineering[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2011.)

(下转第 360 页)