

文章编号: 1672-2892(2010)02-0159-05

一种改进结构的毫米波基片集成波导滤波器

黄 祥, 唐高弟, 李中云, 张贵福

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 介绍了基片集成波导(SIW)这一新技术, 并对其中的主模(TE₁₀)进行了简要分析。为了实现毫米波电路系统小型化, 对传统链式 SIW 滤波器进行改进, 提出了一种新型的带倒角的紧缩结构 SIW 滤波器。利用这 2 种结构, 设计了中心频率为 31.15 GHz, 3 dB 带宽 2.4 GHz, 相对带宽 7.7%, 插损小于 1.9 dB 的带通滤波器。仿真结果表明: 带倒角的紧缩结构 SIW 滤波器不仅布局更紧凑, 最大长度缩短了近一半, 而且具有更好的滤波性能。

关键词: 基片集成波导; 毫米波; 带通滤波器; 低温共烧陶瓷

中图分类号: TN713⁺.7

文献标识码: A

An improved structure for millimeter wave substrate integrated waveguide filter

HUANG Xiang, TANG Gao-di, LI Zhong-yun, ZHANG Gui-fu

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China)

Abstract: A new technique called Substrate Integrated Waveguide(SIW) was proposed, and then its dominant mode(TE₁₀) was briefly analyzed. In order to miniaturize the millimeter wave circuit system, this study improved the traditional chain SIW filter and brought forward a new type of compact configuration with chamfer angle. Based on these two structures, the bandpass filters were designed with the center frequency of 31.15 GHz, the Fractional Bandpass Width(FBW) of 7.7%, and the maximum insertion loss less than 1.9 dB. The simulation results showed that when compared with the traditional one, the compact SIW filter with chamfer angle tended to be more structurally compact, with the maximum length being shortened by half. Moreover, the performance of the filter was getting better than before.

Key words: Substrate Integrated Waveguide; millimeter wave; bandpass filter; Low Temperature Co-fired Ceramic

在现代毫米波系统设计中, 集成化、小型化已然成为了一种新的趋势, 滤波器在毫米波电路中扮演了非常重要的角色。在许多雷达、通信设备中, 对滤波器尺寸的要求越来越高, 这从一定程度上推进了小型化、高性能的毫米波滤波器的研制。基片集成波导(SIW)是一类新型波导, 它一般由上下表面金属化的介质基片中嵌入两列平行的金属圆柱构成。基于 SIW 的滤波器具有很多优点, 如体积小, 插损小, 造价低, 易于集成等, 所以基片集成波导被广泛应用于滤波器、功分器等各种微波毫米波无源器件的设计中^[1-2]。

1 基片集成波导中的 TE₁₀ 模

由于基片集成波导具有和传统矩形金属波导相类似的传输特性, 因此可以用传统矩形波导来等效基片集成波导, 这大大简化了基片集成波导的分析和设计。和传统金属矩形波导一样, 基片集成波导中的主模也是 TE₁₀ 模。所不同的是, 金属矩形波导中, TE, TM 模在其临界波长大于电磁波在自由空间的波长的情况下均可自由传输, 而基片集成波导中只能传输 TE_{m0} 模。这是因为在基片集成波导中, 侧壁的表面电流只能沿着金属通孔在上下金属面之间流动, 而相邻两金属通孔的间距切断了沿侧壁流动的电流, 从而破坏了波导中的场分布, 并引起强辐射及反射。因此, 在传统矩形波导中能产生沿侧壁流动的电流的模式(如 TE_{mn}($n \neq 0$)模和 TM 模), 都不能在基片集成波导中传输。

收稿日期: 2009-10-14; 修回日期: 2009-11-08

基金项目: 中国工程物理研究院国防预先研究资助项目(426010502)

对于基片集成波导中的主模 TE₁₀，等效波导的宽度和长度分别为^[3]：

$$W_{\text{eff}} = W - 1.08 \frac{d^2}{b} + 0.1 \frac{d^2}{W} \quad (1)$$

$$L_{\text{eff}} = L - 1.08 \frac{d^2}{b} + 0.1 \frac{d^2}{L} \quad (2)$$

式中： W, L 分别为基片集成波导的宽度和长度； d 为金属通孔的直径； b 为相邻孔间距。Y Cassivi 等在文献[4]中指出，TE_{m0} 与 TE₁₀ 模计算得到的 W_{eff} 和 L_{eff} 差别很小，所以式(1)~式(2)同样适用于 SIW 在高次模传输时与金属矩形波导的等效计算中。在 SIW 中，TE₁₀ 模的截止频率可以表示为：

$$f_{c(\text{TE}_{10})} = \frac{c_0}{2W_{\text{eff}} \sqrt{\varepsilon_r}} \quad (3)$$

式中： ε_r 为介质的介电常数； c_0 为自由空间的光速。为了让电磁波在基片集成波导中是 TE₁₀ 单模传输的，必须满足：

$$\frac{\lambda}{2} < W_{\text{eff}} < \lambda \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{c_0}{f \sqrt{\varepsilon_r}} \quad (5)$$

由于在微波毫米波系统中，电路一般是由大量的微带线、共面波导或其他形式的导波结构构成，由此带来了基片集成波导和其它电路结构的转换问题，其中比较常见的是 SIW 与微带线的转换。微带线的特性阻抗由金属条带中心处电压与电流的比值来定义，为了实现阻抗匹配转换，也应该用同样的方法定义基片集成波导的阻抗。文献[5]给出了传统矩形金属波导用电压—电流定义的 TE₁₀ 模等效特性阻抗计算公式：

$$Z_e = \frac{U}{I} = \frac{\pi b}{2a} \eta_{\text{TE}} \quad (6)$$

式中： a 和 b 分别为矩形波导宽壁和窄壁的内尺寸； η_{TE} 为 TE 波的波阻抗。据此，可以求得基片集成波导中 TE₁₀ 模用电压—电流定义的等效阻抗：

$$Z_{\text{TE}_{10}} = \frac{\pi}{2} \frac{h \eta_0}{W_{\text{eff}} \sqrt{\varepsilon_r - \left(\frac{\lambda_0}{2W_{\text{eff}}}\right)^2}} \quad (7)$$

式中： h 为基片集成波导的介质基板厚度； $\eta_0 = 120\pi$ 是空气中的波阻抗； λ_0 是空气中的波长。

2 基片集成波导滤波器的设计与仿真

2.1 基片集成波导谐振腔

金属矩形波导中，TE_{mnp} 模的谐振频率为：

$$f_{mnp} = \frac{c_0}{2\pi\sqrt{\varepsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{l}\right)^2} \quad (8)$$

但对 SIW 谐振腔，由于其中只能传输 TE_{m0p} 模，故上式可以简化为：

$$f_{m0p} = \frac{c_0}{2\pi\sqrt{\varepsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{W_{\text{eff}}}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{L_{\text{eff}}}\right)^2} \quad (9)$$

在 SIW 谐振腔中，主模为 TE₁₀₁ 模，根据式(1)~式(5)、式(7)、式(9)，可以由中心频率 f_0 大体确定谐振腔的外形尺寸 W 和 L ，如图 1(a)所示。实际上， W 和 L 一般并不相等，但差别较小，所以也可以取相同的值，这样比较简便。基板厚度 h 与中心频率 f_0 无关，它主要影响滤波器的品质因数和等效阻抗，谐振腔的最终尺寸通过仿真软件优化确定。

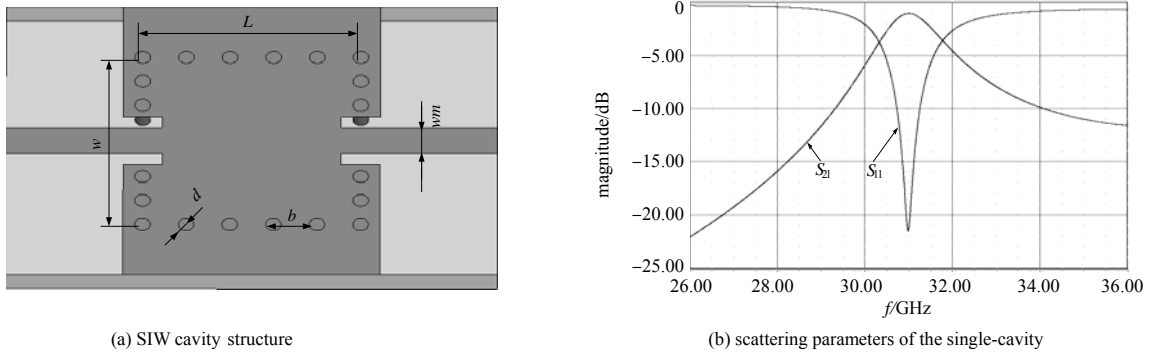


Fig.1 SIW cavity
图1 基片集成波导谐振腔

单个 SIW 谐振腔的散射参数如图 1(b)所示，由它可快速算出滤波器的外在品质因数^[6]：

$$Q_e = 2f_0 / \Delta f_{-3\text{dB}} \tag{10}$$

式中： f_0 为谐振频率； $\Delta f_{-3\text{dB}}$ 是 S_{21} 曲线的 3 dB 带宽。当两个 SIW 谐振腔互相耦合时，耦合系数 k 可以由其散射参数曲线得到^[6]。

$$k = \frac{f_U^2 - f_L^2}{f_U^2 + f_L^2} \tag{11}$$

式中： f_U 是高频率的谐振点； f_L 是低频率的谐振点，如图 2 所示。

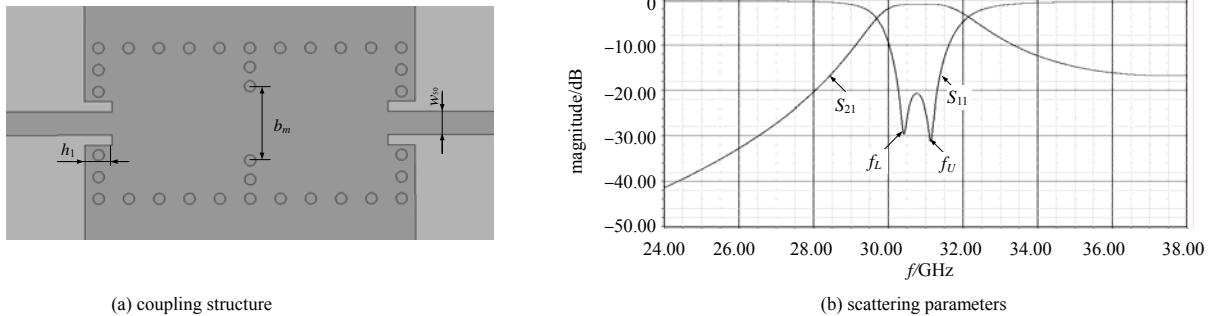


Fig.2 Coupling structure and scattering parameters of the dual SIW cavities
图2 双 SIW 腔体耦合结构及散射参数曲线

根据经典滤波器理论，外在品质因数和耦合系数的表达式为^[7]：

$$Q_{e1} = \frac{g_0 g_1}{FBW}, Q_{en} = \frac{g_n g_{n+1}}{FBW}, k_{n,n+1} = \frac{FBW}{\sqrt{g_n g_{n+1}}} \tag{12}$$

式中： FBW 为滤波器的相对带宽； Q_{e1}, Q_{en} 分别为输入输出端的外在品质因数； $k_{n,n+1}$ 为相邻谐振腔耦合系数； g_n 为低通滤波器原型的元件参数。式(10)~式(12)建立了滤波器电参数和物理结构之间的联系，通过调整滤波器结构中的输入输出微带线宽度 w_m 、端口耦合深度 h_1 、耦合孔宽度 b_m 等物理参数，使得式(10)~式(11)得到的 Q_e, k 值和式(12)给出的理论值相等，最终确定滤波器物理结构。

2.2 带倒角的紧缩结构 SIW 滤波器

传统 SIW 滤波器一般采用链式结构，谐振腔并排位于一条直线上，如图 3(a)所示。这种结构很直观，比较容易实现，下边带性能优异，但不便于整体布局，影响系统的小型化。文献[8]提出了一种新型的 SIW 滤波器结构，它采用双排金属通孔耦合的方法，取得了良好的效果。在此基础上，本文采用一种相似的紧缩结构，4 个谐振腔形成一个类似“田”字的分布。为了提高输入、输出端口的隔离度，把 2 个端口分别设在滤波器结构的左右两侧，见图 4(a)，这不仅使得整体结构变得紧凑，尺寸变小，布局灵活性也大大增加。文献[9]还指出：缩短耦合孔之间的距离有助于改善上边带。为此，端口的开口一侧紧靠相邻耦合孔所在边，而其它耦合孔仍然处在各边的中间。进一步研究表明：带倒角的紧缩结构 SIW 滤波器具有更好的阻带衰减特性以及驻波特性，见图 4(b)。

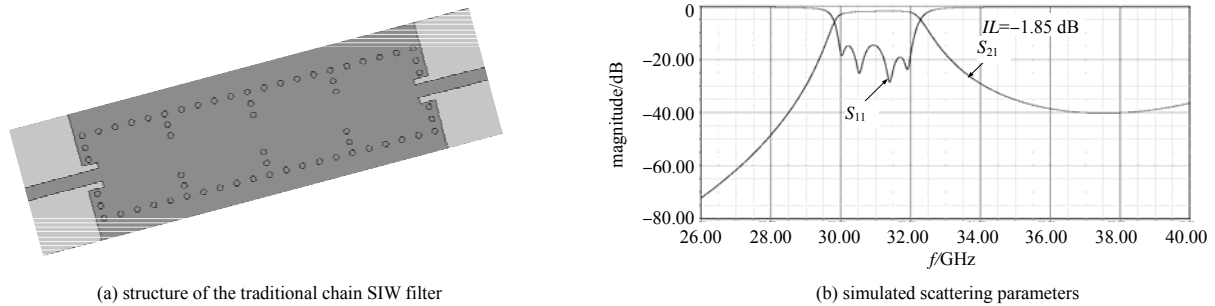


Fig.3 Traditional chain SIW filter
图3 传统链式结构 SIW 滤波器

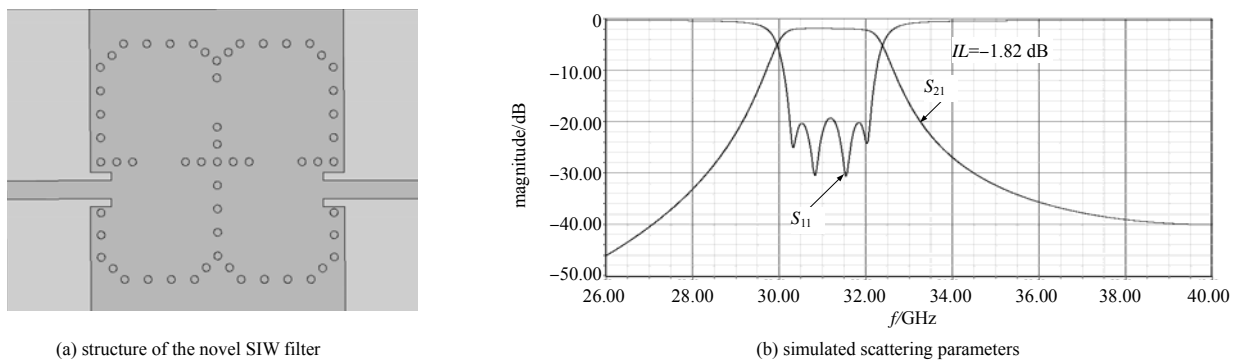


Fig.4 Compact SIW filter with chamfer angle
图4 带倒角的紧缩结构 SIW 滤波器

2种滤波器均采用了对称结构,基板材料 Ferro-A6S 为介电常数 5.9,介质损耗 0.15%,厚度为 0.282 mm 的生瓷片。输入输出端口为 $50\ \Omega$ 微带线,宽度 0.43 mm,直接完成微带线与基片集成波导之间的过渡,省去了以往在端口处还需增加一个阶梯型阻抗变换器来实现到 $50\ \Omega$ 微带线的转换^[6],在一定程度上也缩短了滤波器的尺寸。传统链式结构的 SIW 滤波器的尺寸为: $14.8\ \text{mm} \times 4.36\ \text{mm}$,而带倒角的紧缩结构滤波器的尺寸只有: $8.7\ \text{mm} \times 7.15\ \text{mm}$ 。可见,改进的滤波器在长度上缩短了近一半,占据面积也有所减小。在 Ansoft HFSS 中对这 2 种结构的 SIW 滤波器进行仿真和优化,结果见图 3(b),4(b)。其指标均为:中心频率 31.15 GHz,3 dB 带宽 2.4 GHz,相对带宽 7.7%,插损小于 1.9 dB。仿真结果表明,带倒角的紧缩型滤波器不仅在结构上使滤波器的整体尺寸变小,而且性能上也得到显著改善,上下边带更对称,反射参数 S_{11} 也由原来的 -20 dB 变为约 -25 dB,通带更平坦。

3 结论

基片集成波导是一类新型波导,它具有品质因数高,易于设计,体积小,重量轻,容易加工,造价低和方便集成等优点。本文利用 2 种不同结构,在介电常数为 5.9 的 LTCC 材料 Ferro-A6S 上进行了 SIW 滤波器的仿真。结果表明,带倒角的紧缩结构滤波器不仅在长度上比传统链式 SIW 滤波器缩短了近一半,而且滤波性能也得到了很大的改善。

参考文献:

- [1] Dominic Deslandes,Wu Ke. Millimeter-Wave Substrate Integrated Waveguide Filters[C]// Proc. IEEE CCECE-CCGEI, Montreal. 2003:1917-1920.
- [2] Hiroshi Uchimura,Takeshi Takenoshita,Mikio Fujii. Development of a "laminated waveguide"[J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and techniques, 1998,46(12):2438-2443.
- [3] Xu Feng,Wu Ke. Guided-Wave and Leakage Characteristics of Substrate Integrated Waveguide[J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and techniques, 2005,53(1):66-72.
- [4] Cassivi Y,Perregrini L,Arcioni P,et al. Dispersion Characteristics of Substrate Integrated Rectangular Waveguide[J]. IEEE Trans on Microwave and Wireless components Letters, 2002,12(9):333-335.

(下转第 168 页)