

# 基板集成非辐射介质 波导激励电路研究

胡笑君, 许 锋, 李 芊

(南京邮电大学电子科学与工程学院, 江苏南京, 210003)

**摘 要:** 随着直接在印刷电路板(PCB)或金属化的介质板上制作基板集成非辐射介质(SINRD)波导的概念提出,如何用平面电路的方式激励此种 SINRD 波导是今后广泛应用 SINRD 波导电路的要解决的关键技术之一,这是因为这一技术的解决可以为平面多层化毫米波系统在更高频率上的使用打下基础. 本文提出了一种利用微带线到槽线过渡结构,然后利用槽线准 TEM 波主模和 SINRD 波导  $LSM_{11}$  主模的场型相似性,用槽线去激励 PCB 型 SINRD 波导的新型馈电结构. 通过使用多层结构,电路由两层的 ArlonTC600 的 PCB 组成,从微带结构到槽线的过渡电路可以直接焊接在稍薄的板上. 接下来可在接近 SINRD 波导介质条带的中心位置激励所需的工作模式  $LSM_{11}$  模,这种槽线到 SINRD 波导的配置可以获得更宽的带宽和高度的集成. 仿真和实验结果证实了上述观点的正确性.

**关键词:** 印刷电路板; 槽线; 基板集成非辐射介质波导

**中图分类号:** TN624

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2017)08-1985-04

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.08.025

## A Transition from Microstrip to SINRD Waveguide of PCB Version

HU Xiao-Jun, XU Feng, LI Qian

(School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China)

**Abstract:** Since the substrate integrated nonradiative dielectric(SINRD) waveguide fabricated directly on printed circuit boards(PCBs) was proposed, it has been a key issue how to excite the SINRD waveguide by using a planar structure. This paper presents a novel planar transition of the SINRD waveguide. The transition first uses a transition structure from microstrip to slotline. After that, since the field distribution of quasi-TEM mode of a slotline is similar to that of SINRD waveguide  $LSM_{11}$  mode, the main mode  $LSM_{11}$  of SINRD waveguide can be excited very well. By using multi-structure, two Arlon TC600 boards with different heights, the transition from microstrip to slotline can be directly fabricated on the thinner board. In this way, the good performance of the transition from microstrip to slotline can be achieved while the slotline is located almost in the middle of the dielectric strip of SINRD waveguide therefore can be used to excite the SINRD waveguide. It means that wider bandwidth and higher integration can be obtained. The simulation results and measurement data verify the novel transition.

**Key words:** printed circuit board; slot line; substrate integrated nonradiative dielectric waveguide

### 1 引言

1981年, T. Yaneyama 等人提出了一种新型的介质波导结构—非辐射介质波导 Nonradiative dielectric waveguide, 简称 NRD 波导<sup>[1]</sup>. 非辐射介质(NRD)波导在提出之初就以其在高频段的优良性能在毫米波电路

与系统领域引起广泛关注. 有别于传统的传输线, NRD 波导呈现出低金属损耗特性以及在弯曲和不连续处无辐射的特性. 然而 NRD 波导由于其结构上固有的缺陷, 导致加工异常困难, 因而极大地限制了其在微波毫米波集成电路系统中的发展.

为了解决 NRD 波导存在的易发生装配错误和加工

困难的问题,基片集成非辐射介质波导(SINRD)应运而生<sup>[2-7]</sup>.通过扩宽介质条带,SINRD波导的加工主要是定位变得更加容易.然而作为对NRD波导的首次改进,SINRD波导仍然需要两个额外的金属板覆盖,这样的改进而引入的SINRD波导仍然是立体电路,难于与其它平面电路进行集成.印刷电路板(PCB)型SINRD波导的提出<sup>[5]</sup>,彻底改变了NRD波导加工困难的问题,更重要的是新型的SINRD波导是一个标准的平面电路.与以前的SINRD波导不同,PCB型SINRD波导是通过直接在PCB板或金属涂层的介质板上打孔来实现的,由于不需要对过孔进行金属化,因此PCB型SINRD波导的加工复杂度要明显低于目前广泛研究中的基片集成波导(SIW)电路.PCB型SINRD波导是一个纯粹平面电路的这一特点意味着它可以极其方便地与其他平面电路集成,并且PCB型SINRD波导依然保留着高频情况下导体损耗低的优点,因此它被认为在高频毫米波混合集成系统领域里极具发展前景.

和NRD波导以及早期的SINRD波导一样,PCB型SINRD波导激励依然是比较困难的,这是因为为了降低金属损耗,所选用的NRD波导中的工作主模是 $LSM_{11}$ 模,这种模式的场型结构对激励带来了极大的挑战.以前NRD波导和SINRD波导主要采用旋转 $90^\circ$ 的矩形波导进行激励,要想把PCB型SINRD波导真正实用化和平面化,必须摒弃这种激励方式.也有研究涉及通过微带线来激励NRD波导<sup>[8,9]</sup>,所以类似结构也能应用于PCB型SINRD波导<sup>[10]</sup>,可以用一个从微带线过渡到PCB型SINRD波导,但这种激励的带宽和性能难于满足要求.本文研究了PCB型SINRD波导工作主模 $LSM_{11}$ 模的场型特点,发现了这个场型与槽线传输线的准TEM模场型的相似性,因而提出了用槽线来激励PCB型SINRD波导的构想.激励时,槽线结构要尽量置于SINRD波导中心条带的中部.为验证这个构想,槽线传输线用微带线来激励,以便进行测量.设计中使用了两种不同高度的Arlon-TC600电路板,以兼顾微带线到槽线激励电路和槽线到SINRD波导激励电路.仿真和实验结果验证了此激励电路具有良好的性能和更宽的带宽.

## 2 激励电路设计构思

我们首先研究SINRD波导中的工作模式,通过观察工作主模的 $LSM_{11}$ 模的场型特征,定性提出可行的激励电路方案.当然也可以时域有限差分法(FDTD)进行定量分析<sup>[11]</sup>.

### 2.1 NRD主模 $LSM_{11}$ 模

高频工作时,金属损耗对电路和天线的影响将越来越严重,为了降低金属损耗,NRD波导的工作主模是

$LSM_{11}$ 模, $LSM_{11}$ 模的电场和磁场分量示于图1,从图中可以看出,电场分布的特征使得在两块导体板附近电磁场是非常小的,因此导体表面电流也非常小,这是NRD波导金属损耗小的根本原因.图中,磁场和 $y$ 方向是相互垂直的,因此这种模式也可以表述为 $TM^y$ 模.在中心条带区域, $LSM_{11}$ 模电磁场方程为<sup>[12]</sup>:

$$E_x = -A(\beta_y/\epsilon_r)(\pi/a)\cos(\pi x/a)\sin(\beta_y y) \quad (1a)$$

$$E_y = (A/\epsilon_r)(\beta^2 + (m\pi/a)^2)\sin(\pi x/a)\cos(\beta_y y) \quad (1b)$$

$$E_z = j(A/\epsilon_r)\beta\beta_y\sin(\pi x/a)\sin(\beta_y y) \quad (1c)$$

$$H_x = -A\omega\epsilon_0\beta\sin(\pi x/a)\cos(\beta_y y) \quad (1d)$$

$$H_y = 0 \quad (1e)$$

$$H_z = jA\omega\epsilon_0(\pi/a)\cos(\pi x/a)\cos(\beta_y y) \quad (1f)$$

式中, $A$ 是任意常数, $\beta_y$ 是 $y$ 向传播常数, $\beta$ 是 $z$ 向传播常数, $a$ 是导体板间距, $\epsilon_r$ 是介质条带相对介电常数.尽管PCB型SINRD波导和NRD波导有所区别,但是定性的分析还是可以借用的.

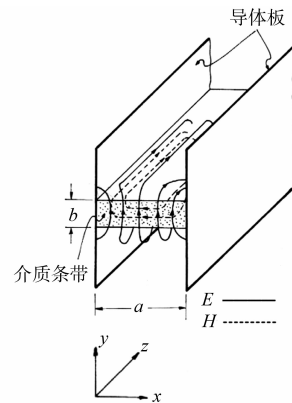


图1 NRD波导的 $LSM_{11}$ 模场型

### 2.2 槽线主模-准TEM模

经典的槽线传输线是通过在介质板上的金属涂层上开槽而构成的<sup>[13]</sup>,由于空气和介质材料同时存在,因此槽线传输线就象微带和共面波导传输线一样,不存在完纯的TEM模.然而,准TEM模是可以存在,并且是槽线传输线的工作主模.槽线传输线的一个主要优点是可以和其它平面电路方便地集成在一起,比如说,可以在微带电路的背面接地板上制作槽线电路,这种混合组成的电路为微波电路和天线设计带来了极大的灵活性.

如图2所示,是槽线传输线的工作主模-准TEM模的场型,由于是准TEM模,我们在图中示出了半个波长距离上的电磁场场型分布.比较图1和图2的场型分布,我们可以发现两者是非常相似的,这启发我们如果把槽线结构置于PCB型SINRD波导中心条带的中部,一个性能良好的SINRD波导就有可能设计出来.

### 2.3 SINRD激励电路

综上所述,要把槽线传输线置于PCB型SINRD波

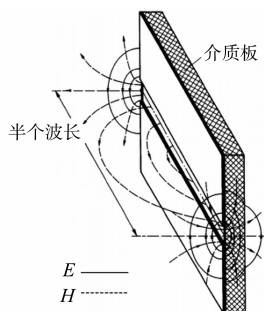


图2 槽线传输线的准TEM模场型

导介质条带的中部,为了达成这个目标,可以选用多层结构来设计电路,最佳选择是用两层等厚度的相同介质板来组成 SINRD 波导.槽线传输线用微带线来激励,微带线到槽线的过渡电路可以用上节所述的单层 PCB 板复用结构来实现<sup>[8]</sup>.然而,微带线到槽线的过渡电路的设计要求,可能导致严格把槽线传输线置于 SINRD 波导介质条带中心的目标难以达成,这种情况下,可以考虑采用两层厚度不同、同型号的 PCB 来制作 SINRD 波导.槽线传输线偏离 SINRD 波导介质条带中心所带来的误差用其它方法给予补偿.

考虑到 NRD 波导的工作模式是  $LSM_{11}$ ,在此我们给出了一种新型的过渡结构.如图 3 所示,把一根槽线设计在一个基片和一个更薄的基片之间.另外可以发现在第二层底部的基片上面(图 3b),定位了两个微带线给槽线馈电.注意,第一层底面无金属敷层.我们使用槽线和 SINRD 波导之间的线性渐变来补偿槽线因为没有放置在 PCB 版本 SINRD 波导的中间高度而带来的误差(如图 3),图 3 中的渐变实际上起到类似于厚度增加的作用.此外,把两种不同高度的 PCB 结合起来,以此高度作为 PCB 型 SINRD 波导的高度,通过这样的方式可以使槽线激发出所需要的模式.由于两种不同的高度的基片很好的集成在一起,不再需要任何额外组装元件,证明此方案具有显著的结构性优势.

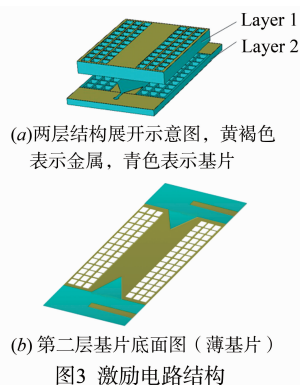


图3 激励电路结构

### 3 激励电路仿真和实验

为了加工的方便,新型激励电路采用圆形通孔,其

仿真结构如图 4 所示.取面积为  $20 \times 16\text{mm}^2$  和高度  $h_1 = 2.54\text{mm}$ ,以及面积为  $30 \times 16\text{mm}^2$  和高度  $h_2 = 1.27\text{mm}$  的两块 Arlon TC600 ( $\epsilon_r = 6.25$ ) PCB,分别作为新型激励电路的一层和二层基板,并且把两个相同微带线放置在二层基板的背面.微带线的宽度设为  $w_m = 1.75\text{mm}$ ,槽线宽度设为  $w_s = 0.5\text{mm}$ ,取介质条带有效宽度  $W_{nrd} = 5.5\text{mm}$ .圆形通孔半径设置为  $r = 0.75\text{mm}$ ,孔间距  $g = 0.3\text{mm}$ .利用以上所设定的各个参数,利用三维电磁仿真软件对该结构进行仿真和优化.

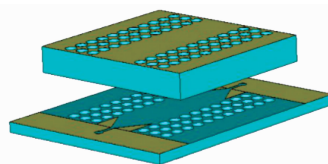


图4 新型激励电路几何示意图

图 5 所示为所提出的新型激励电路实物分解图.从图 5 可以看到,加工实物拓宽了通孔两侧的区域,并预留了四个螺丝位孔,这是因为实际加工条件不足,无法实现两层板之间的层压而采取用螺丝固定的方式.采用 Agilent N5227A 矢量网络分析仪和大底座测量夹具 SC5225 进行测量.

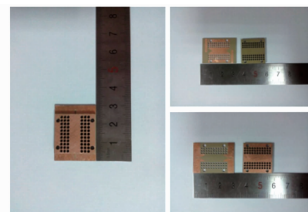


图5 微带线到SINRD激励电路实物图

图 6 给出了微带线到 SINRD 激励电路仿真与实测结果对比图,从图 6 可知,基于微带线到槽线过渡的圆形孔实现的 SINRD 波导的馈电结构所实现的工作带宽约为  $4\text{GHz}$  ( $21\text{GHz} \sim 26\text{GHz}$ ),且在工作带宽内,该馈电结构的传输损耗均在  $6\text{dB}$  以下,回波损耗均大于  $15\text{dB}$ .由此可见,基于微带线到槽线过渡的新型馈电电路结构可以很好地激励所需的工作模式,且具有较宽的工作带宽.

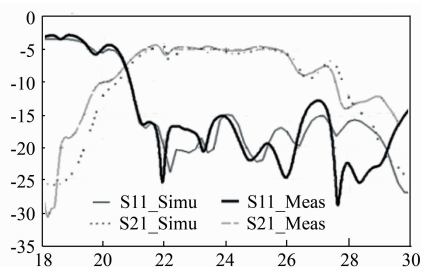


图6 微带线到SINRD激励电路仿真与实测结果对比图

## 4 结论

本文提出的利用槽线传输线的准 TEM 模和 NRD 波导的工作主模 LSM<sub>10</sub> 模的场型相似性来设计 PCB 型 SINRD 波导激励电路的构想是确实可行的。通过使用两种不同高度的基片,以兼顾微带到槽线转换电路的设计,将槽线夹在两个基片之间,通过两组渐变线的设计来抵消两个基片高度不同所带来的影响。通过仿真和实验,我们发现该激励电路性能良好。这种过渡结构具有高度集成和制作容易的特点。直接在 PCB 板上制作 SINRD 波导是一种刚提出不久的技术,有关该技术的研究仍在继续。本文对此激励电路的研究同时也是为了验证该波导结构与平面电路混合集成技术的可行性,后续更多的、更全面的理论与应用分析将继续开展。该激励电路的设计预示了 PCB 型 SINRD 波导具有广阔的发展空间。

### 参考文献

- [1] Yoneyama T, Nishida S. Nonradiative dielectric waveguide for millimeter-wave integrated circuits [J]. IEEE Transaction on Microwave Theory Techniques, 1981, 28(11): 1188 - 1192.
- [2] Cassivi Y, Wu, K. Substrate integrated NRD(SINRD) guide in high dielectric constant substrate for millimetre wave circuits and systems [A]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest [C]. Fort Worth: IEEE, 2004. 1639 - 1642
- [3] Cassivi Y, Wu, K. Substrate Integrated Nonradiative Dielectric Waveguide [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2004, 14(3): 89 - 91.
- [4] Cassivi Y, Wu, K. Substrate integrated circuits concept applied to the nonradiative dielectric guide [J]. IEE Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation, 2005, 152(6): 424 - 433.
- [5] Xu F, Wu K. Substrate integrated nonradiative dielectric waveguide structures directly fabricated on printed circuit boards and metalized dielectric layers [J]. IEEE Transaction on Microwave Theory Techniques, 2011, 59(12): 3076 - 3086.
- [6] Attari J, Djerafi T, Wu K. Planar orthogonal mode transducer based on orthogonal LSM<sub>10</sub> and TE<sub>10</sub> modal fields of co-layered image SINRD (iSINRD) and SIW guides [A]. European Microwave Conference (EuMC) [C]. Nuremberg: IEEE, 2013. 597 - 600.
- [7] Attari J, Djerafi T, Wu K. A Compact 94 GHz image substrate integrated non-radiative dielectric (iSINRD) waveguide cruciform coupler [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2013, 23(10): 533 - 535.
- [8] Han L, Wu K, Bosisio R. An integrated transition of microstrip to nonradiative dielectric waveguide for microwave and millimeter-wave circuits [J]. IEEE Transaction on Microwave Theory Techniques, 1996, 44(7): 1091 - 1096.
- [9] Wu K, Han L. Hybrid integration technology of planar circuits and NRD guide for cost effective microwave and millimeter wave application [J]. IEEE Transaction on Microwave Theory Techniques, 1997, 45(6): 946 - 954.
- [10] Li F, Xu F. An integrated transition of microstrip to substrate integrated nonradiative dielectric waveguide based on printed circuit boards [A]. International Symposium on Antennas and Propagation Conference [C]. Nanjing: IEEE, 2013. 188 - 191.
- [11] 许锋, 洪伟, 周后型. 计算周期性导波结构的时域有限差分方法 [J]. 电子学报, 2003, 31(6): 937 - 939.  
Xu F, Hong W, Zhou H. FDTD algorithm for the periodic guided waves structures [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(6): 937 - 939. (in Chinese)
- [12] Shibani K Koul. Millimeter Wave and Optical Dielectric Integrated Guides and Circuits [M]. New York: John Wiley & Sons, INC, 1997.
- [13] K C Gupta, Ramesh Garg, Inder bahl, Prakash Bhartia. Microstrip Lines and Slotlines [M]. Boston and London: Artech House, 1996.

### 作者简介



胡笑君 女, 1981 年出生于河南南阳市, 现为南京邮电大学电子科学与工程学院博士生, 主要从事毫米波电路与天线技术研究, 电磁场仿真算法研究。



许 锋 (通信作者) 男, 1963 年出生, 现为南京邮电大学电子科学与工程学院特聘教授, 博士生导师, 主要从事毫米波电路与天线技术研究, 电磁场仿真算法研究。  
E-mail: feng. xu@njupt.edu.cn

李 芊 女, 1989 年出生, 南京邮电大学电子科学与工程学院硕士生。