

文章编号: 1001 - 893X(2012)08 - 1411 - 06

不对称槽线及其在三维微波集成电路中的应用*

姬五胜^{1,2}, 张 玉², Nefyodov E I³, 郭 宏²

(1. 兰州城市学院 电子信息科学与技术研究所, 兰州 730070; 2. 兰州理工大学 计算机与通信学院, 兰州 730050;
3. 俄罗斯科学院 无线电工程与电子学研究所 弗凉基诺分部, 弗凉基诺 141190, 俄罗斯)

摘 要:介绍了不对称槽线的特性,分析了以不对称槽线构建的复合环、支线定向耦合器、平衡功率分配器、多层滤波器、多信道功率分配器等组件的性能。这些组件体积小、重量轻、频带宽、电压驻波系数小,并且大多数可应用于毫米波段,是三维微波集成电路中的重要组成部分。研究表明不对称槽线具有优良的特性。

关键词:三维微波集成电路;不对称槽线;定向耦合器;功率分配器;多层滤波器;电压驻波系数;功率分配
中图分类号:TN454 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1001-893x.2012.08.037

Asymmetry Slot Line and its Applications in 3DMICs

Ji Wu-sheng^{1,2}, ZHANG Yu², Nefyodov E I³, GUO Hong²

(1. Institute of Electronic Information Science and Technology, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China;
2. School of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. Fryazino
Department of Institute of Radio-engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, Fryazino 141190, Russia)

Abstract: This paper introduces the characteristic of asymmetric slot line, and analyses its applications in microwave three-dimensional integrated circuits (3DMICs), including transitions with the other transmission lines, composite rings, branch line directional couplers, the average power annular dividers, the multi-layer filter, and the multi-channel distributor. They have low voltage standing wave ratio (VSWR), wide frequency bandwidth, light weight and small size, and most can be used in millimeter wave band. Researches demonstrate the excellent characteristics of asymmetric slot line.

Key words: 3DMIC; asymmetry slot line; directional coupler; power divider; multi-layer filter; voltage standing wave ratio; power dividing

1 引 言

由于通信技术的飞速发展,现代通信系统对微波器件的小型化和宽频带提出了更高的要求,微波平面电路由于体积大、集成度低已不能满足通信设备高性能和微型化的需求,这就迫使微波电路向三维集成发展,同时应用范围也要求拓宽到毫米波频

段及更高频段。

在三维微波集成电路中,电磁信号依靠传输线来引导,同一层电路中不同类型传输线间要实现信号耦合,不同电路层间的传输线也要实现信号耦合。故在三维微波集成电路中,经常出现多个传输线的组合,且不同层的传输线必须和专门的过渡结构配合使用。传输线的基本类型有微带线、带状线、槽

* 收稿日期:2012-02-27;修回日期:2012-06-12

基金项目:2010年人力资源与社会保障部国家留学人员科技活动择优项目资助

Foundation Item: Project Supported by the Scientific Research Foundation of the State Human Resource Ministry and the Education Ministry for Returned Chinese Scholars

线、共面波导等。在微型化的微波集成电路中,像微带线、槽线的使用是受限制的^[1],因为它们有较高的工艺复杂性和较低的电性能参数。1985年,前苏联的Nefyodov. E. I 率先开展了不对称槽线的基础特性研究^[1];由于不对称槽线具有双面拓扑结构,在多层电路中它和微带线、槽线的组合不需要专门的过渡,不需要在基片中钻孔,也不需要导带之间的焊接,且载流导体分布在基片的两侧^[2],使得它能以简单的结构工艺实现复合环^[2]、支线定向耦合器^[3]、平衡功率分配器^[3]、多层滤波器^[4]、多信道功率分配器^[4]等,这些组件是三维微波集成电路中的重要组成部分。

尽管不对称槽线在20世纪80年代已被提出^[1],并展开在三维微波集成电路中的应用研究^[2-6],但公开发表的研究不对称槽线的文章数量极少。1990年,R. Janaswamy 分析了不对称槽线传播的基本模式,建立了谱域表达式,得到了不对称槽线的传播常数和特性阻抗的数值结果^[7]。2000年,M. Ribó 和 L. Pradell 用六端口网络模型分析了不对称槽线谐振器^[8]。2006年,J. T. Apostolos 设计了一个不对称槽线L形天线^[9]。国内学术界、产业界对这类传输线重视不够,对它的研究几乎是空白。本文引入了不对称传输线的基础研究,并分析其在微波三维电路集成中的应用,充分展示不对称槽线的优良特性。

2 不对称槽线

2.1 不对称槽线概述

在三维微波集成电路中,存在大量不同类型传输线及其匹配元件的组合,其横截面如图1所示。图1中第I部分是带状线,第II部分是槽线,第III部分是共面线,第IV部分是不对称槽线。

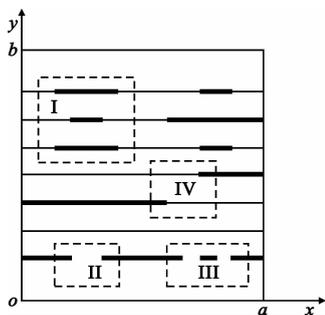


图1 微波三维电路集成导波结构
Fig.1 The structure of three-dimensional microwave circuits integrated waveguide

大多数微波三维电路集成都以不对称槽线作为部分元件。不对称槽线由分布在电介质基片两侧的平行金属半平面所构成;按照金属半平面的相对分布,可以得到不对称槽线的各种变体,分为有交叠(图2(a))、无交叠(图2(b))和零交叠(两个金属半平面的边缘上下彼此对齐)^[4]。图2(c)、(d)、(e)是不对称槽线的电流分布。

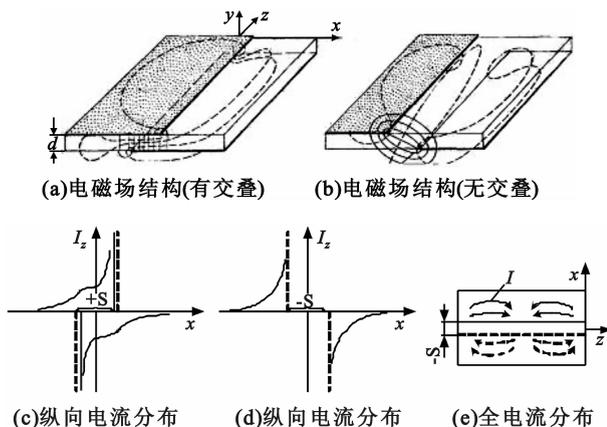


图2 不对称槽线
Fig.2 Asymmetric slot line

2.2 不对称槽线的特性

不对称槽线的有效介电常数 ϵ_{eff} 和波阻抗 Z 有以下关系^[1]:

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{1}{4} \epsilon \left[3 + \text{th} \left(\left(\frac{\epsilon}{d} - q \right) / 2(\epsilon - 1) \right) \right] \quad (1)$$

$$Z = (120\pi / \sqrt{2\epsilon}) K'(k) / K(k) \quad (2)$$

式中, s 为不对称槽线上下交叠金属层边缘之间的距离, d 为介质基片的厚度, K, K' 为系数 k 的第一类椭圆积分, $q = (s/d)(2 - \epsilon) + \epsilon(\epsilon - 1)/4, k = 0.515 + 0.5\text{th}(s/d - 0.75)$ 。

图3(a)、(b)中曲线1代表按照式(1)、(2)的计算结果^[2],“·”为氧化铝基片($\epsilon = 9.8$)不对称槽线的实验数据,曲线2、3分别为与不对称槽线具有相同结构参数的微带线和槽线的计算数据。图3(c)为用HFSS软件仿真的延迟系数^[5]。

不对称槽线的结构具有不需要实现窄导带和窄槽的特点,可达到任意的波阻抗值。当金属片交叠时($s > 0$),其波阻抗与微带线接近;当交叠部分达到或超过半波长,即与微带线完全一致,此时波阻抗较小,可产生导行波和表面波。当金属片不交叠时($s < 0$),其特性与槽线相似,此时波阻抗较大,辐射较大。

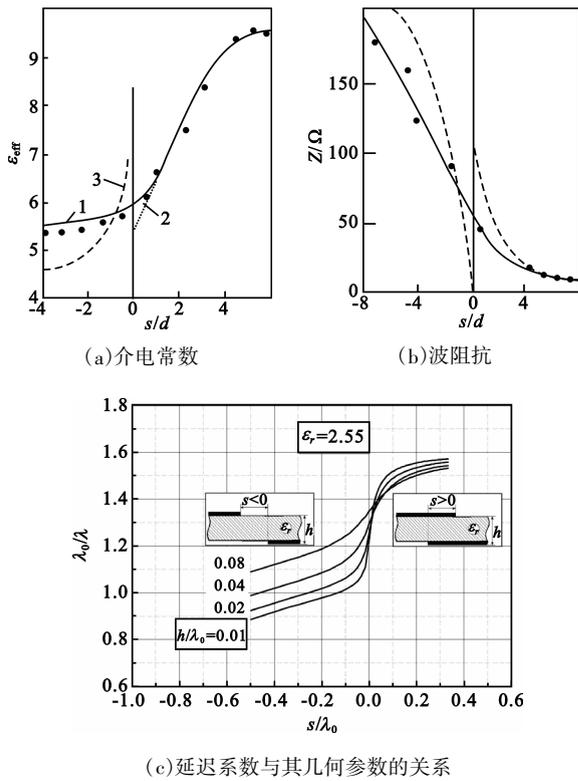


图 3 不对称槽线的有效相对介电常数

Fig.3 The effective relative permittivity of the asymmetric slot line

3 不对称槽线在微波三维电路集成中的应用

3.1 不对称槽线与其他传输线的过渡

图 4(a)是不对称槽线与微带线构成的 T 形接头,此时微带线与两条不对称槽线并联,输出臂中是同相激励信号。在 $Z < 50 \Omega$ 时,该接头在一个倍频程内 $VSWR < 1.1$ ^[1]。

图 4(b)是不对称槽线与槽线构成的 T 形接头,槽线的两个半金属平面与基片另一侧的半金属平面形成不对称槽线;此时槽线与两条不对称槽线串联,输出臂中是反相激励信号。由于连接处的场结构较为匹配,当输出阻抗 $Z > 50 \Omega$ 时,反射系数很小,即 $VSWR \rightarrow 1$ ^[1]。

图 4(c)是从槽线到微带线复合过渡的一种魔 T 接头。横向臂 3、4 是介质基片 5 两侧平面上金属镀层形成的不对称槽线。如果复合环从槽线 1 激励,信号将对称地分配到两个不对称槽线横向臂 3、4 之间。微带线 2 的带条末端是相对于缝隙型 T 型接头的 $\lambda/4$ 开路支路 6。不对称槽线臂 3、4 相对于输入端口 1 串联,而相对于输入端口 2 并联,它们的匹配阻抗是槽线 1 输入阻抗的 2 倍,同时也等于微带线 2

输入阻抗的一半。在 5.2 ~ 11 GHz 频带上,这种魔 T 接头功率分配的不均匀性不超过 0.3 dB,横向臂之间的相位不均匀性不超过 2° 。在 8.5 ~ 11 GHz 频带上,缝隙输入端口 1 和横向臂 3、4 之间的平均损耗为 0.2 dB,微带线输入端口 2 方向上的平均损耗为 0.3 dB^[6]。

图 4(d)是矩形波导 - 不对称槽线的过渡结构,为了平滑过渡,把不对称槽线的上、下金属片做成圆弧状。这种过渡由于没有采用连接线,频带可达几个倍频程,属于超宽带过渡^[3]。

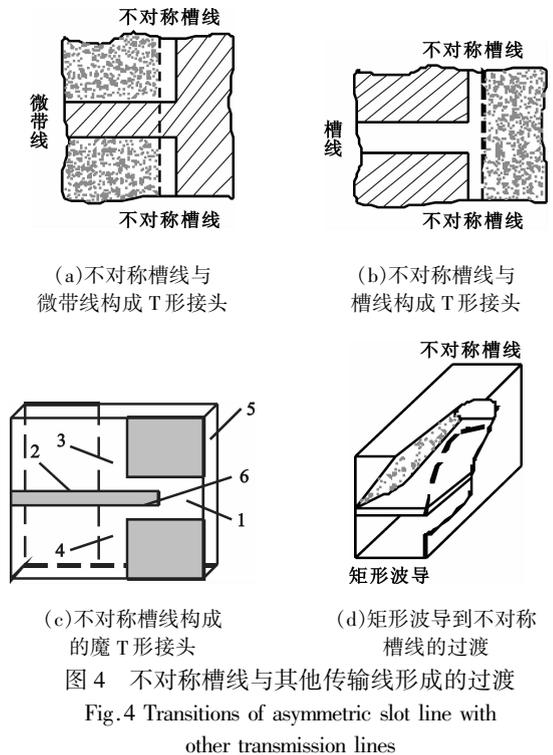
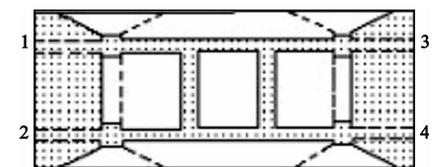


图 4 不对称槽线与其他传输线形成的过渡

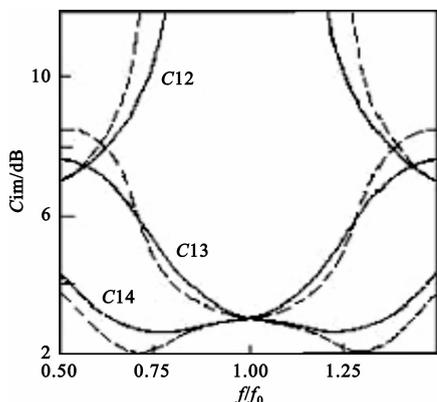
Fig.4 Transitions of asymmetric slot line with other transmission lines

3.2 不对称槽线在支线定向耦合器中的应用

支线定向耦合器借助两个或更多的支线实现两类传输线的连接,而且它们之间的长度和距离都是 $\lambda/4$ 。在工作频带增大时,定向耦合器的边缘支线工艺实现困难,这是定向耦合器的缺点。当边缘支线为高阻时 ($\rho > 120 \Omega$),利用不对称槽线可以实现边缘支线^[3],如图 5(a)所示。图 5(b)表示支线定向耦合器过渡衰减的频率特性,实线、虚线分别代表支线数目为“3”、“4”时的情况。可以看出支线数目增多时,工作频带变宽。利用不对称槽线实现边缘支线时,支线的数目可以超过 3 个,突破了传统支线定向耦合器的工艺限制,而且随着支线数目的增多,定向耦合器的性能会变好。



(a) 支线定向耦合器

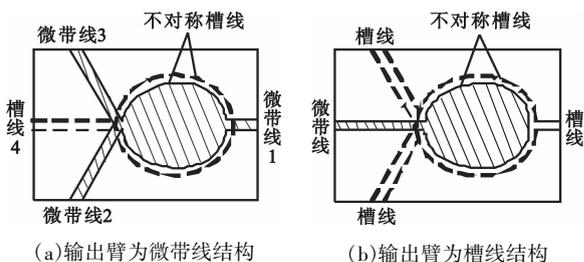


(b) 频率特性

图5 支线定向耦合器及其过渡衰减的频率特性
Fig.5 The branch line directional coupler and the transit attenuation characteristics by frequency

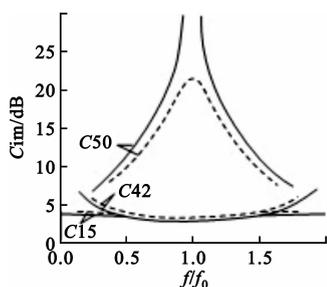
3.3 不对称槽线构成的 $\lambda/2$ 复合环

使用不对称槽线可以组成 $\lambda/2$ 复合环,如图6所示^[2]。图6(a)中,输入臂1和输出臂2、3都是微带线,臂1在水平直径方向接入环,臂2、3沿直径轴线对称放置,槽线输入臂4沿直径轴线的另一个方向在两个输出臂2、3的连接点上接入,放置在介质层的另一个面上;此时复合环有两面拓扑,上、下两层的环形导体构成不对称槽线,环的直径为 $\lambda/4$ 。



(a) 输出臂为微带线结构

(b) 输出臂为槽线结构



(c) (a)结构的过渡衰减特性

图6 不对称槽线组合 $\lambda/2$ 复合环

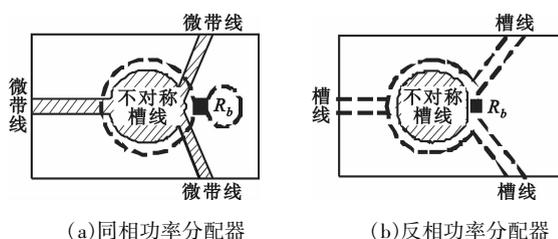
Fig.6 $\lambda/2$ composite loop with asymmetric slot line

在槽线输入臂的信号激励下,会反相激励微带线输出臂;而在微带线激励下,则会同相激励输出臂。由于一段 $\lambda/4$ 环线的平衡,输出臂之间可实现 0° 、 180° 的相移,功率在输出臂上保持非常宽的频带,可达3个倍频程(图6(c))。由于环相对于输出臂的对称性,输入臂之间的去耦很大(去耦的测量数据大于40 dB)。

图6(b)的工作原理与图6(a)类似。这种微型化的复合环不仅电性能优异,而且重量、体积都很小。

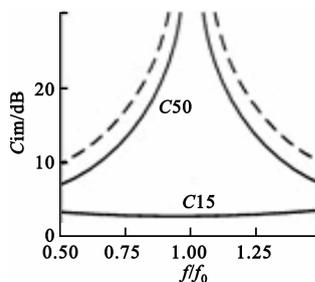
3.4 不对称槽线构成的环形平衡功率分配器

图7是两个小型化的平衡功率分配器^[3],不对称槽线是 $\lambda/2$ 的圆环。同相功率分配时(图7(a)),输入、输出臂是微带线,平衡电阻 R_b 并联基于槽线的 $\lambda/4$ 短路支线(图中虚线圆弧是在下层金属板上刻划出的空心圆,这种方式可以扩展工作频带);反相功率分配时(图7(b)),输入、输出臂是槽线,平衡电阻 R_b 处于介质中连接不对称槽线上、下层的电流导体。平衡电阻可以是集总元件或分布参数元件,借助薄膜导体粘连底层实现。图7(c)是平衡功率分配器衰减的频率特性,实线、虚线分别代表同相、反相情形,同相和反相功率分配时,衰减曲线吻合得较好,输出臂之间的去耦相差很小。这种平衡功率分配器不需要引入附加的传输线来实现移相,且由于拓扑中无连接线,可以应用到毫米波频段。



(a) 同相功率分配器

(b) 反相功率分配器



(c) 过渡衰减特性

图7 $\lambda/2$ 不对称槽线平衡功率分配器及其过渡衰减特性
Fig.7 The power distributors with $\lambda/2$ asymmetric slot line and the transit attenuation characteristics

3.5 不对称槽线构成的多层滤波器

图 8 是一个三次谐振三维耦合的立体带线滤波器^[4],其中有 3 个基于不对称槽线的 $\lambda/2$ 开路谐振器,邻近的谐振器互为镜像对称。该滤波器通过多层电介质基片的组合实现,在 $\epsilon = 10$ 的基片的两侧刻划了不对称槽线金属层。基片之间放置了 $\epsilon = 2.32$ 、厚度为 0.22 mm 的电介质层。滤波器的输入、输出谐振器是 50 Ω 槽线,信号激励在槽线磁场波腹处实现。谐振器之间的耦合会随介质层的厚度改变而改变,且随着介质层厚度的增加耦合在减弱。测量得到的该滤波器的幅频特性曲线如图 8(b) 所示。可以看出,在通带内损耗小于 1.8 dB,而阻带内损耗大于 26 dB,测量结果与切比雪夫逼近结果基本吻合。衰减陡度有偏差,表明在该滤波器中不但存在相邻谐振器之间磁场的串联耦合,而且在第一个和最后一个谐振器之间有补充的磁场耦合(感性耦合);分布在阻带里的极点,表明滤波器具有准椭圆幅度频率特性。为了实现阻带内的频率特性均衡,整个滤波器空间都设计为耦合区域。这种谐振器沿垂直方向立体分布,故这种滤波器最显著的特点是降低了重量、缩小了体积。

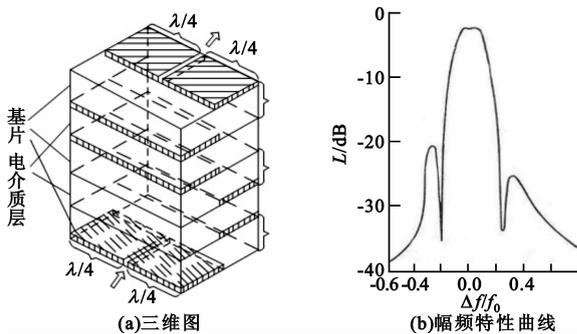


图 8 基于不对称槽线的三次谐振滤波器

Fig.8 The three-resonator filter based on asymmetric slot line

3.6 不对称槽线在多信道功率分配器中的应用

一个四信道微波信号功率分配器的结构如图 9 所示^[4],它由带状线组合构成,在不同的层之间形成了不对称槽线。不对称槽线会引起横向寄生波,可以通过增大上、下金属层边缘的间距 θ_2 来抑制,同时通过介质层侧壁金属镀层来抑制。电长度为 θ_1 的带状线同相激励两个窄条微带线 θ_2 ,而 θ_2 连接着微带线 θ_3 。在其他层带状线、微带线的分布与上述过程形同。穿过介质层的盲孔(金属柱)实现了带状线中的电位平衡和寄生波的抑制,另一方面也起到

了加固作用。在厘米波段测量两信道功率分配器 ($C_{12} = C_{13} = 3$ dB),在一个倍频程的工作频带上,功率分配的不均匀性小于 0.2 dB,电压驻波系数 $VSWR \leq 1.25$ 。从这些数据可以看出,这种四信道功率分配器性能良好。

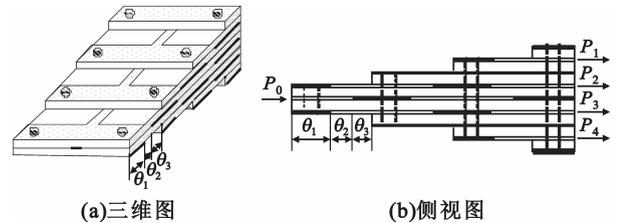


图 9 四路功率分配器

Fig.9 A quadruple power distributor

4 结束语

首先,本文给出了不对称槽线的结构和电磁场及电流分布图,分析了其有效介电常数及特性阻抗的变化曲线图,得出了不对称槽线的结构性能特性:当金属片交叠时($s > 0$),其波阻抗与微带线接近,当交叠部分达到或超过半波长,即与微带线完全一致,此时波阻抗较小,可产生导行波和表面波;当金属片不交叠时($s < 0$),其特性与槽线相似,此时波阻抗较大,辐射较大。因此,不对称槽线的结构具有不需要实现窄带带和窄槽即可达到任意波阻抗值的特点。其次,本文详细研究了不对称槽线在过渡结构、定向耦合器、多层滤波器和多信道功率分配器等三维微波集成电路组件中的应用,并对这些结构的性能参数进行了分析和说明。不对称传输线在三维微波集成电路中起着重要的作用,必须引起国内学术界的足够重视,期待在理论和应用两个方面取得更为深入的研究。

参考文献:

- [1] Гвоздев В И, Нефёдов Е И. Объёмные интегральные схемы СВЧ [М]. Москва: Наука, 1985.
- [2] Гридин В Н, Нефёдов Е И., Черникова Т. Ю. Электродинамика структур крайне высоких частот [М]. Москва: Наука, 2002
- [3] Нефёдов Е И. Техническая электродинамика [М]. Москва: Академия, 2008.
- [4] Нефёдов Е И. Антенно - фидерные устройства и распространение радиоволн [М]. 2 - издание. Москва: Академия, 2008.
- [5] Клюев С Б, Нефёдов Е И, Ji Wusheng. Несимметричная

щелевая линия (НЩЛ), Численный анализ [С]// физика и технические приложения волновых процессов, посвященную 150 – летию со дня рождения А.С.Попова, Самара, 2008;498 – 501.

- [6] Гвоздев В И. Миниатюрные гибридные устройства СВЧ [J]. Зарубежная радиоэлектроника, 1981(11): 35 – 47.
- [7] Janaswamy R. Wiener – Hopf analysis of the asymmetric slot-line[J]. Radio science, 1990(25):699 – 706.
- [8] Ribó M, Pradell L. Circuit model for a coplanar – slotline cross[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 2000 (10): 511 – 513.
- [9] Apostolos J T. Meander – lineless wide bandwidth L – shaped slot line antenna[P]. United States Patents, 2006.

作者简介:

姬五胜(1968—),男,甘肃秦安人,2004年于上海大学获博士学位,2010年于西安电子科技大学博士后出站,现为教授、中国电子学会高级会员,主要研究方向为微波电路三维集成、无线电技术与信息系统、计算电磁学等;

Ji Wu-sheng was born in Qin'an, Gansu Province, in 1968. He received the Ph.D. degree from Shanghai University in 2004 and the Postdoctoral degree from Xi'an University of Electronic Science and Technology in 2010. He is now a professor and a senior member of CIE. His research interests include three – dimensional integration of microwave circuits, wireless technology and information system, computational electromagnetics and so on.

Email:wshji1326@sohu.com

张 玉(1986—),女,湖北襄阳人,硕士研究生,主要研究方向为无线通信理论与技术;

ZHANG Yu was born in Xiangyang, Hubei Province, in 1986. She is now a graduate student. Her research concerns the theory and technology of wireless communication.

Nefyodov E I(1932—),男,乌克兰塔甘罗格人,俄罗斯科学院无线电工程与电子学研究所教授、俄罗斯工程院院士、俄罗斯《微波、毫米波与光波的电动力学与技术》主编,1997年被美国传记协会授予“全球科学技术 500 位领袖人物”称号,主要研究方向为微波电路三维集成,已出版 27 部著作,发表 250 篇学术论文;

Nefyodov E I was born in Taganrog, Ukrain, in 1932. He is now a professor from Radio Engineering and Electronics Research Institute of Russian Academy of Science and an academician in Russian Academy of Engineering and also the chief editor of Electrodynamics and Technology of Micro and Millimeter and Optical Waves. He was awarded the title of 500 leaders of global science and technology by American Biographical Institute in 1997. He concentrates on the 3 – dimensional integration of microwave circuits and has 27 books and 250 research papers in print.

郭 宏(1987—),男,湖北天门人,硕士研究生,主要研究方向为无线通信理论与技术。

GOU Hong was born in Tianmen, Hubei Province, in 1987. He is now a graduate student. His research concerns the theory and technology of wireless communication.