

## 太赫兹平面肖特基二极管参数模型

赵向阳<sup>1</sup>, 王俊龙<sup>1</sup>, 邢东<sup>1</sup>, 杨大宝<sup>2</sup>, 张立森<sup>1</sup>, 梁士雄<sup>1</sup>, 冯志红<sup>1</sup>

(1. 专用集成电路国家级重点实验室, 河北 石家庄 050051;  
2. 中国电子科技集团公司第十三研究所, 河北 石家庄 050051)

**摘要:** 根据太赫兹平面肖特基二极管物理结构, 在理想二极管 SPICE 参数模型的基础上建立了二极管小信号等效电路模型。依据该二极管等效电路模型设计了基于共面波导(CPW)去嵌方法的二极管 S 参数在片测试结构, 并对其在 0.1~50 GHz、75~110 GHz 频率范围内进行了高频小信号测试, 利用测试结果提取了高频下二极管电路模型中各部分电容、电阻以及电感参数。将相应的高频下电容与电阻参数分别与低频经验公式电容值和直流 I-V 测试提取的电阻值进行了对比, 并利用仿真手段对高频参数模型进行了验证。完整的参数模型以及测试手段相较于理想二极管 SPICE 模型和传统的参数提取方法可以更为准确地表征器件在高频下的工作状态。该建模思路可用于太赫兹频段非线性电路的优化设计。

**关键词:** 太赫兹; 肖特基二极管; 小信号等效电路模型; 在片测试结构

**中图分类号:** TN315.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1225004

## Parameters model of terahertz planar Schottky diode

Zhao Xiangyang<sup>1</sup>, Wang Junlong<sup>1</sup>, Xing Dong<sup>1</sup>, Yang Dabao<sup>2</sup>, Zhang Lisen<sup>1</sup>,  
Liang Shixiong<sup>1</sup>, Feng Zhihong<sup>1</sup>

(1. National Key Laboratory of ASIC, Shijiazhuang 050051, China;  
2. The 13th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050051, China)

**Abstract:** Based on the SPICE parameters model of ideal diode, a modified small-signal equivalent circuit model of terahertz planar Schottky diode was built according to the physical structure of the diode. On-wafer device-under-test (DUT) structure based on CPW de-embed method was designed according to the equivalent circuit model of the diode. The small-signal S parameters were measured in the frequency range of 0.1–50 GHz and 75–110 GHz. All the parameters of diode model such as capacitances, resistances and inductances were extracted via the test results. Comparison between DC I–V resistances, empirical formula capacitances and high frequency parameters was made. Both of the capacitances and resistances at high frequencies were different from low frequencies. The built small-signal equivalent circuit model of terahertz planar Schottky diode was validated by simulation and the results of model simulation agree well with the DUT S-parameters. Complete equivalent circuit model and the testing

收稿日期: 2016-04-20; 修订日期: 2016-05-23

作者简介: 赵向阳(1989-), 男, 硕士, 主要从事固态太赫兹器件及模型方面的研究。Email: uestcxyz@qq.com

通讯作者: 冯志红(1973-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事宽禁带半导体与固态太赫兹电子器件方面的研究。

Email: ga917vv@163.com

method can more accurately represent the working state of the device under high frequency compared with the ideal diode SPICE model and the parameters of the traditional extraction method. This robust method is suitable for Schottky diode model extraction, which is useful for further nonlinear circuit design and optimization in terahertz wave frequencies.

**Key words:** terahertz; Schottky diodes; small signal equivalent circuit model; DUT structure

## 0 引言

太赫兹肖特基二极管是由金属-半导体接触特性制作而成,具有强非线性、速度快、室温工作以及易于系统集成等特点,是固态太赫兹源系统以及太赫兹超外差接收机系统的核心器件,在太赫兹通信、太赫兹测量仪器和天文观测等领域中应用前景广阔。目前国际上主要采用 GaAs 平面肖特基二极管开展太赫兹频段变频技术研究<sup>[1-3]</sup>。

建立准确的非线性器件模型并通过适当的测试手段提取模型特征参数是变频电路设计的重要部分和前提。在以往的太赫兹二极管建模中,二极管的非线性工作特性一般利用理想二极管 SPICE 参数模型进行表征,模型中结电容值一般采用低频(1 MHz) $C-V$ 测试或肖特基结电容经验公式获取<sup>[4]</sup>,级联电阻和其他一些参量多采用直流  $I-V$  测试法提取<sup>[5]</sup>。与理想二极管相比,平面形式的二极管为了便于电路集成,增加了阴极 Pad、阳极 Pad、空气桥引线和衬底等结构,这些结构会导致额外的寄生参量,此时仅用理想二极管模型会存在局限性。当器件工作频率上升至太赫兹频段时,所产生的电磁耦合、自热效应、趋肤效应等现象都会影响其工作性能<sup>[6]</sup>,使得高频工作参数值与低频时相比会有较大不同。常用来描述太赫兹频段器件非线性工作特性的理想 SPICE 模型存在不足之处,这也导致电路模块设计优化的难度增加。

针对于此,文中研究了平面肖特基二极管的物理结构,对理想二极管 SPICE 模型进行扩充,将二极管各部分利用等效元件进行表征,建立了改进的二极管小信号等效电路模型。在模型参数提取方面不同于以往低频  $C-V$ 、直流  $I-V$  测试法,设计了基于共面波导去嵌的太赫兹二极管小信号参数在片测试图形,并利用矢量网络分析仪在 0.1~50 GHz 和 75~110 GHz 频段内进行了在片测试。利用更精确的测试手段得到测试结构的 S 参数,用以提取二极管高

频工作参数。并将相应的参数值与利用经验公式所得低频电容值和直流  $I-V$  测试提取的电阻进行了对比。利用理想二极管模型代替参数模型的本征部分,将其与寄生元件结合构成等效电路模型并进行仿真验证,得到了可用于表征二极管在太赫兹低频段小信号特性的参数模型。

## 1 模型与测试结构

太赫兹平面砷化镓肖特基二极管由半绝缘 GaAs 衬底,外延层 N<sup>+</sup>区、N<sup>-</sup>区,阳极肖特基结,阴极欧姆接触,阳极 Pad、阴极 Pad,空气桥等部分组成。图 1 所示为二极管的剖面结构以及高频小信号等效电路模型。

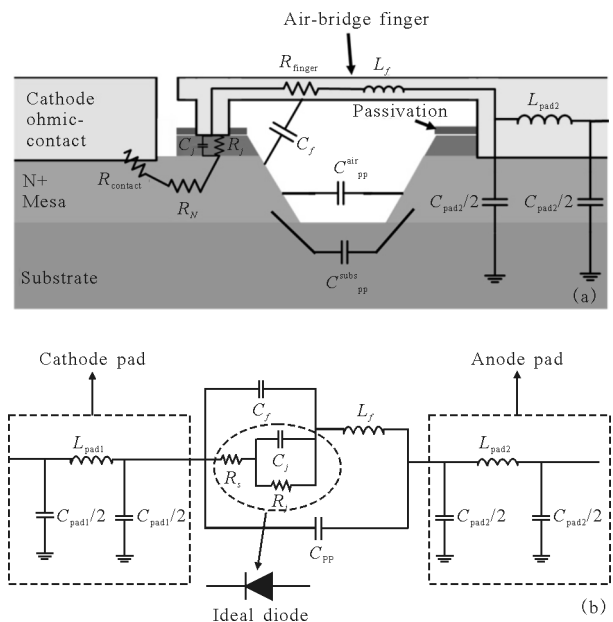


图 1 平面肖特基二极管剖面结构下电路参量(a)及二极管高频小信号等效电路模型(b)

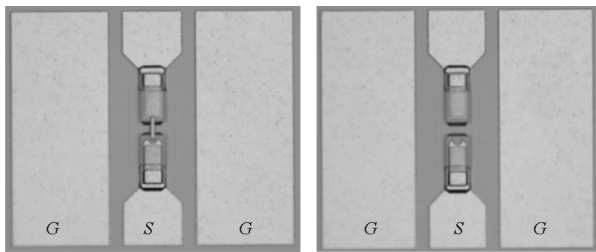
Fig.1 Circuit elements of planar Schottky diode at cross-sectional view (a) and high frequency small-signal equivalent-circuit model of diode (b)

在二极管剖面结构中,肖特基结部分表征为与

偏置电压相关的结电容  $C_j$ 、结电阻  $R_j$ 。寄生电容  $C_{\text{par}}$  包含了空气桥与 Pad 之间的电容  $C_f$  和二极管两个 Pad 之间的电容  $C_{\text{pp}}$ 。二极管的总电容  $C_{\text{tot}}$  为结电容  $C_j$  和寄生电容  $C_{\text{par}}$  之和。 $R_N$  为 N<sup>-</sup>区未耗尽部分以及 N<sup>+</sup>区的电阻,  $R_{\text{contact}}$  为欧姆接触电阻,  $R_{\text{finger}}$  为空气桥中的电阻。肖特基二极管级联电阻  $R_s$  由  $R_N$ 、 $R_{\text{contact}}$  和  $R_{\text{finger}}$  组成。二极管空气桥引线寄生电感为  $L_f$ 。

将二极管剖面结构各部分利用等效元件进行表征,对之前的理想模型进行了完善,将整个模型扩充为包含了 3 个本征参量和 7 个寄生参量的电路拓扑结构,使之能够完整地表征平面二极管结构特性。在二极管高频小信号等效电路中阴极、阳极 Pad 表征为寄生电感  $L_{\text{pad}}$  和电容  $C_{\text{pad}}$ 。 $C_j$ 、 $R_j$ 、 $R_s$  为模型的本征参量,在文中用理想二极管模型代替; $C_{\text{pad1}}$ 、 $C_{\text{pad2}}$ 、 $C_f$ 、 $C_{\text{pp}}$ 、 $L_{\text{pad1}}$ 、 $L_{\text{pad2}}$  和  $L_f$  为模型的寄生参量。由于频率低于 110 GHz 时二极管的物理尺寸远小于测试波长的  $1/10(\lambda/10 \geq 270 \mu\text{m})$ ,所以可忽略由波长相位差所引起的其他分布寄生参数<sup>[7]</sup>。

利用等效电路结构并基于共面波导去嵌原理,文中设计了器件在片测试图形,测试结构如图 2 所示。图 2(a)为二极管完整测试结构,用以提取二极管管内总电容  $C_{\text{tot}}$ 。图 2(b)中去掉了阳极结和空气桥引线部分,对应的高频参数模型中  $C_j$  和  $C_f$  被去除,此时  $C_{\text{tot}}$  等于  $C_{\text{pp}}$ 。这种结构用来提取二极管衬底寄生电容  $C_{\text{pp}}$  和空气桥引线电容  $C_f$ 。测试结构基片为  $12 \mu\text{m}$  半绝缘 GaAs。测试所用肖特基二极管来自于参考文献 [8] 中阳极端点支撑空气桥结构 GaAs 二极管,肖特基阳极结为圆形,直径为  $2.0 \mu\text{m}$ 。二极管通过阴极、阳极焊盘与  $2 \mu\text{m}$  厚 CPW 金属信号端相接。



(a)  $C_{\text{tot}}$  提取结构 (b)  $C_{\text{pp}}$  提取结构  
(a) Test structure for the extraction of  $C_{\text{tot}}$  (b) Test structure for the extraction of  $C_{\text{pp}}$

图 2 器件高频在片测试图形

Fig.2 High frequency DUT on-wafer structure

在片测试方面采用 GSG 信号探针,每个端口的输入功率为  $-10 \text{ dBm}$ ,测试时在二极管阳极端加入  $-5.5 \sim 1 \text{ V}$  的偏置电压,同时在每个电压偏置点进行  $0.1 \sim 50 \text{ GHz}$ 、 $75 \sim 110 \text{ GHz}$  的扫频,以获得不同频率下二极管的  $C-V$  曲线。

在进行参数提取时利用其微波网络参数矩阵表征二极管模型。当频率较低时,二极管金属部分近似为短路线,寄生电感  $L_f$  和  $L_{\text{pad}}$  可忽略。以阴极 Pad 端为端口 1,阳极 Pad 端为端口 2,两端口网络互易,其  $Y$  参数矩阵描述为:

$$[Y] = \frac{1}{R_j(V)} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} + j\omega \begin{bmatrix} C_{\text{pad1}} + C_j(V) + C_{\text{par}} & -(C_j(V) + C_{\text{par}}) \\ -(C_j(V) + C_{\text{par}}) & C_{\text{pad2}} + C_j(V) + C_{\text{par}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

二极管 Pad 寄生电容  $C_{\text{pad}}$  以及总电容  $C_{\text{tot}}$  由公式(2)、(3)进行求解:

$$C_{\text{pad}} = \frac{\text{Im}(Y_{ii} + Y_{jj})}{\omega} \quad (i, j = 1 \text{ 或 } 2, \text{ 且 } i \neq j) \quad (2)$$

$$C_{\text{tot}_i} = \frac{\text{Im}(-Y_{i2})}{\omega} \quad (3)$$

二极管零偏压结电容  $C_{j0}$ 、寄生电容  $C_{\text{par}}$  可根据肖特基二极管  $C-V$  公式从  $C_{\text{tot}}$  中分离:

$$C_{\text{tot}} = C_j + C_{\text{par}} = \frac{C_{j0}}{\left(1 - \frac{V}{\psi_{bi}}\right)^M} + C_{\text{par}} \quad (4)$$

式中:  $M$  表征二极管外延层掺杂的均匀性,一般为  $0.5$ ;  $\psi_{bi}$  为肖特基结内建电势,一般为  $0.8 \text{ V}$ 。

寄生电容  $C_{\text{pp}}$  由图 2(b)中去除阳极结和空气桥的测试结构提取,此时有:

$$C_{\text{tot}(b)} = C_{\text{pp}} \quad (5)$$

则寄生电容  $C_f$  为:

$$C_f = C_{\text{par}} - C_{\text{pp}} \quad (6)$$

正向偏压下理想二极管模型中的肖特基结电阻  $R_j$  可忽略不计,正偏电阻为对应的级联电阻  $R_s$ ,高频下  $R_s$  值视为正偏时对应的阻抗参数实部。

## 2 结果与讨论

对测试图形进行小信号测试,图 3 所示为外加直流偏置电压为零时二极管在片测试  $S$  参数结果。利用测试结果以及相应公式分别提取二极管的电容、电阻和电感参数。

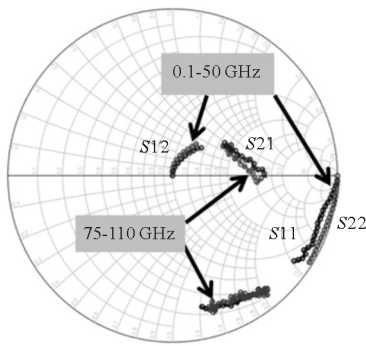


图 3 在片小信号测试 S 参数(去嵌后)

Fig.3 De-embedded S-parameters of on-wafer small-signal measured

根据公式(2)、(3)提取二极管 Pad 电容  $C_{\text{pad}}$  和总电容  $C_{\text{tot}}$ , 结果如图 4 所示。 $C_{\text{pad}}$  为平板寄生电容, 其值在 75~110 GHz 的频段变化趋势相对于低频段增加, 这种变化是由测试设备在高频段校准误差升高所致。相较于明显增长的  $C_{\text{tot}}$ , 可以认为其处在比较稳定的状态, 选取其典型值作为提取结果,  $C_{\text{pad1}}$  约为 13 fF,  $C_{\text{pad2}}$  约为 10 fF。二极管管内总电容  $C_{\text{tot}}$  在低于 50 GHz 频段增长趋势不明显, 约为 14 fF; 在 75~110 GHz 的频段由 19 fF 快速增加到了 34 fF, 这表明在高于 75 GHz 的频段二极管寄生电感效应比较明显, 此时需考虑寄生电感对模型阻抗的影响。

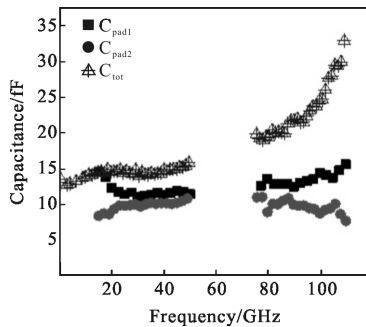


图 4  $C_{\text{tot}}$  与  $C_{\text{pad}}$  提取结果

Fig.4 Extraction results of  $C_{\text{tot}}$  and  $C_{\text{pad}}$

在相同频率、不同偏置电压下提取  $C_{\text{tot}}$ , 得到对应的 C-V 特性曲线。利用公式(4)拟合曲线计算零偏结电容  $C_{j0}$ , 将不同频率下  $C_{j0}$  汇总, 如表 1 所示。

表 1 二极管不同频率下结电容值

Tab.1 Junction capacitances of diode at different frequencies

Frequency /GHz	10	20	30	40	50
$C_{j0}$ /fF	4.62	4.68	4.60	5.06	5.71
Frequency /GHz	75	80	90	100	110
$C_{j0}$ /fF	8.31	8.52	10.59	15.38	25.47

低频二极管结电容参考值可由肖特基结电容的经验公式得到, 为 5.28 fF。表 1 显示, 在低于 50 GHz 时拟合得出的二极管结电容值与公式计算结果相近且增长缓慢。在高于 75 GHz 频段, 结电容增长很快, 是高频段总电容  $C_{\text{tot}}$  增加的原因, 而寄生电容大小与频率无关。利用图 2(b)的参数提取结构以及公式(5)和(6), 可得寄生电容  $C_{\text{pp}}$  约为 3 fF,  $C_f$  约为 5.5 fF。

传统的二极管 SPICE 模型中, 级联电阻  $R_s$  一般利用直流 I-V 测试提取, 其大小与正向电流有关。根据 I-V 测试曲线, 如图 5 所示, 可以得到 1 mA 下对应的  $R_s$  约为 2.7  $\Omega$ 。

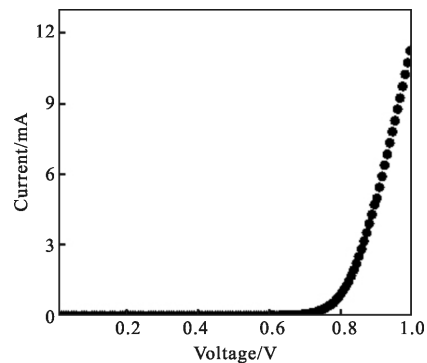


图 5 二极管直流 I-V 测试曲线

Fig.5 Measured DC I-V curves of Schottky diode

高频下二极管参数模型的级联电阻为正偏时阻抗参数的实部, 如图 6 所示, 典型值约为 13  $\Omega$ , 大于直流下总电阻。这是由于金属空气桥、肖特基结和重掺杂  $N^+$  区在高频下存在电磁场趋肤效应、等离子共振效应<sup>[9]</sup>等, 电流集中在空气桥和  $N^+$  区的表面, 导致高频下二极管电阻相较于低频有明显增加。

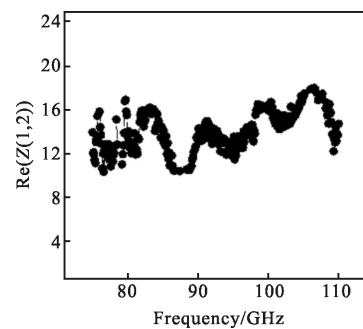


图 6 75~110 GHz 二极管小信号阻抗参数实部

Fig.6 Real part of small-signal Z-parameters for diode in the frequency of 75~110 GHz

二极管寄生电感由阻抗虚部求得。根据结电容



提取结果可知, 在高于 75 GHz 的频段二极管寄生电感比较明显, 不能忽略。可设电感  $L_f$ 、 $L_{pad}$  为常数, 对  $Z(1,2)$  参数虚部在高于 85 GHz 频段进行线性拟合, 得到二极管总寄生电感  $L_{tot}$  约为 83.5 pH。如图 7 所示。

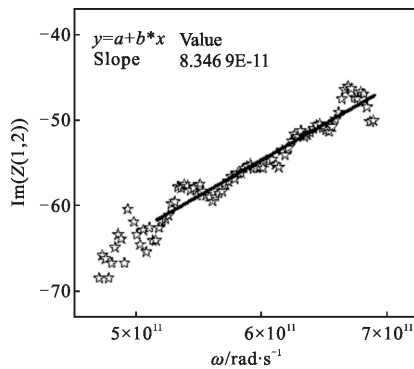


图 7 85~110 GHz 电感拟合曲线

Fig.7 Curve linear fit for inductance in the frequency of 85~110GHz

由于缺少有效的去嵌手段, 文中采用近似拟合

的方法分离  $L_f$ 、 $L_{pad}$ 。阴极、阳极 Pad 在结构上具有相似性, 可假定  $L_{pad1}=L_{pad2}$ , 即  $L_{tot}=L_f+2L_{pad}$ 。将  $L_f$  设为变量, 对  $S$  参数测试结果进行拟合, 可得  $L_{pad}$  约为 35 pH,  $L_f$  约为 13.5 pH。

通过参数值的对比发现采用了小信号测试手段所提取的二极管本征参数包含了高频下寄生电感、趋肤效应的影响。因此可以更为准确地表征器件的工作状态。

### 3 模型验证

在提取模型各部分参量后, 建立对应的平面二极管仿真结构, 整个结构分为理想二极管模型以及寄生元件两部分, 利用理想二极管模型代替本征部分, 并与寄生元件相结合进行仿真验证, 如图 8 所示。在理想二极管模型中, 理想因子  $n$  值、正向饱和电流  $I_s$  参照参考文献[5]中公式, 正向开启电压  $V_j$ 、

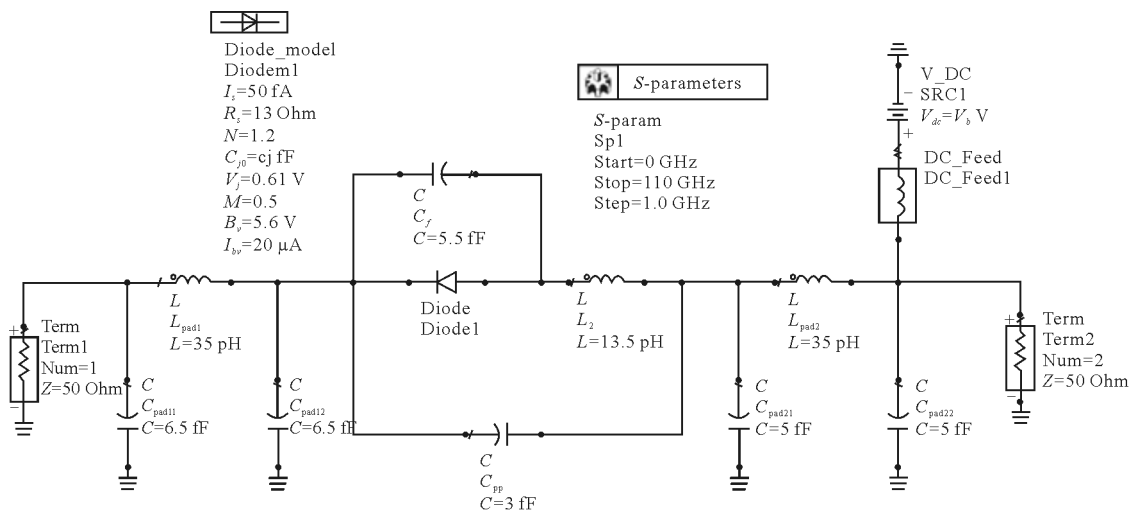


图 8 软件仿真模型

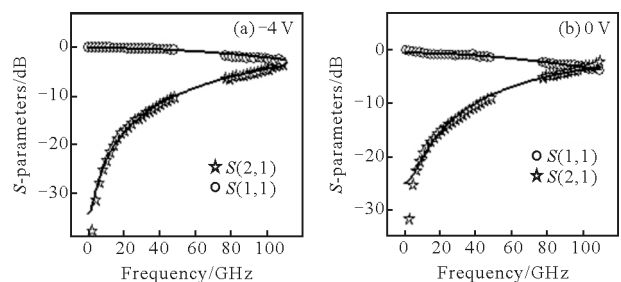
Fig.8 Simulation model

反向击穿电压  $B_v$ 、反向击穿电流  $I_{bv}$  等值来自于实际测量结果。

将所提取的参数典型值键入对应的元件模型, 在 0~110 GHz 进行仿真, 将直流偏置电压为 -4 V、0 V 和 0.6 V 时  $S$  参数仿真结果与相应的测试结果进行对比, 如图 9 所示。

通过对比可以看出, 仿真与测试结果符合得比较好, 可以作为参数模型的验证。同时表明可以直接

利用理想二极管模型表征高频下肖特基平面二极管参数模型的本征部分。



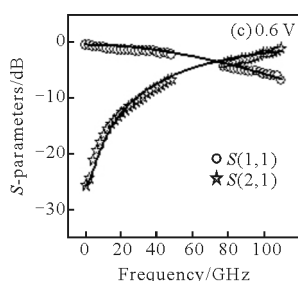


图 9 不同外置偏压下  $S$  参数与测试结果对比(连续曲线为仿真结果,分散点为测试结果)

Fig.9 Comparison of the simulated and measured  $S$ -parameters in different bias voltages(solid lines are the corresponding model responses; dots on the solid lines indicate a range of test points)

## 4 结 论

基于太赫兹肖特基平面二极管的剖面结构对之前的理想模型进行了完善, 添加了用以表征其完整平面结构的寄生参量, 建立了完整的器件高频等效电路模型。利用小信号测试手段, 提取了二极管在 0.1~50 GHz、75~110 GHz 频段内的模型参数。参数提取结果表明: 二极管结电容值在低频时与经验计算值相近, 但在高频受寄生电感的影响, 会伴随频率升高而显著增加; 二极管高频下级联电阻明显高于直流提取结果。相较于理想模型和传统的参数提取方法, 结合了理想二极管本征参量以及高频寄生参量元件的参数模型可以更为准确地表征器件在高频下的工作状态。利用软件仿真对该等效电路进行了模型验证。文中参数模型的建立和提取方法为太赫兹频段倍频和混频电路设计中二极管建模提供了思路。

### 参考文献:

[1] Goutam Chattopadhyay. Technology, capabilities, and performance of low power terahertz sources [J]. *IEEE*

*Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2011, 1(1): 33-53.

[2] Jiang Jun, Zhang Jian, Deng Xianjin. 340 GHz frequency multiplier without matching circuit based on Schottky diodes [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 4028-4034. (in Chinese)

蒋均, 张健, 邓贤进. 340 GHz 基于肖特基二极管未匹配电路倍频源[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(12): 4028-4034.

[3] Miao Li, Huang Wei, Jiang Jun. Research on a 0.17 THz Schottky varactors doubler [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 947-950. (in Chinese)

缪丽, 黄维, 蒋均. 基于肖特基变容二极管的 0.17 THz 二倍频器研制[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(3): 947-950.

[4] Tang A Y. Modeling and characterisation of terahertz planar Schottky diodes [D]. Sweden: Chalmers University of Technology Goteborg, 2013.

[5] Kiuru T, Mallat J, Räisänen A, et al. Schottky diode series resistance and thermal resistance extraction from  $S$ -parameter and temperature controlled  $I-V$  measurements [J]. *IEEE Trans Microw Theory Techn*, 2011, 59(8): 2108-2116.

[6] Tang A Y, Stake J. Impact of eddy currents and crowding effects on high-frequency losses in planar Schottky diodes[J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 2011, 58(10): 3260-3269.

[7] Tero Kiuru, Krista Dahlberg, Juha Mallat, et al. Comparison of low-frequency and microwave frequency capacitance determination techniques for mm-wave schottky diodes [C]// Proceedings of the 6th European Microwave Integrated Circuits Conference, 2011: 53-56.

[8] Xing Dong, Feng Zhihong, Wang Junlong, et al. THz GaAs Schottky diodes with point support air-bridge structure [J]. *Semiconductor Technology*, 2013, 4(8): 279-282. (in Chinese)  
邢东, 冯志红, 王俊龙, 等. 阳极端点支撑空气桥结构太赫兹 GaAs 二极管[J]. *半导体技术*, 2013, 4(8): 279-282.

[9] Fan Guoli, Jiang Yuesong, Liu Li. Analysis on high frequency performance of THz GaAs Schottky mixer diode [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(8): 5374-5380.