

毫米波肖特基二极管表征和在片测试方法

张傲^{1,2}, 高建军^{3*}

- (1. 南通大学 交通与土木工程学院, 江苏 南通 226019;
2. 华东师范大学 极化材料与器件教育部重点实验室, 上海 200241;
3. 华东师范大学 物理与电子科学学院, 上海 200241)

摘要: 本文分析了单口和双口毫米波频段肖特基二极管的测试方法并设计了相应的测试版图, 计算了截止频率随寄生电阻和零偏本征电容的变化曲线, 给出了小信号和大信号等效电路模型。利用两个实际肖特基二极管测试实例对器件的小信号模型参数进行了提取, 实验结果表明, 在导通和截止的S参数吻合较好。

关键词: 肖特基二极管; 测试; 参数提取; 小信号模型

中图分类号: O43 文献标识码: A

Millimeter wave Schottky diode characterization and on-wafer measurement

ZHANG Ao^{1,2}, GAO Jian-Jun^{3*}

- (1. School of Transportation and Civil Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China;
2. Key Laboratory of Polar Materials and Devices, Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200241, China;
3. School of Physics and Electronic Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: In this paper, the one-port and two-port measurement methods for millimeter wave Schottky diodes are developed, and the corresponding test structures are designed. The variation of cut-off frequency with parasitic resistance and zero bias intrinsic capacitance are analyzed. The equivalent circuit models of small signal and large signal are given. A commercial Schottky diode has been used to extract the small signal model parameters. The experimental results show that the S-parameters agree well under on and off bias condition.

Key words: Schottky diode, measurement, modeling, parameter extraction, small signal model

引言

理论上,任何非线性器件均可以将低频信号转换到高频信号,但是考虑到噪声和转换效率,肖特基二极管是一个好的选择。基于砷化镓材料的肖特基二极管在1965年引入毫米波领域^[1],由于工艺的限制和射频元件很难集成,随着工艺和设计技术的进步,现在平面肖特基二极管已被成功证明是具有竞争力和前景的毫米波器件类型之一,主要可以用作混频器和倍频器的设计。2005年,国际固态电

路会刊以“利用集成二极管技术打开太赫兹窗口”为题,介绍了基于肖特基二极管的太赫兹信号源和探测器的研究进展^[2],期望能够跨越“太赫兹技术鸿沟”。2017年,IEEE会刊刊登了太赫兹二极管技术的总结^[3],对太赫兹二极管的现状、前景和应用进行了综述,发现在大多数太赫兹和亚毫米波系统中,砷化镓肖特基二极管仍然是最有用的太赫兹装置。作为一种低寄生器件,肖特基二极管提供了有用的检测和本振源,所设计的混频器和倍增器工作频率可以高达3 THz。在实际的毫米波应用中,设计人

收稿日期: 2022-01-20, 修回日期: 2022-02-20
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(62034003)

Received date: 2022-01-20, revised date: 2022-02-20

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (62034003).

作者简介(Biography): 张傲(1995—),女,江苏南京人,博士,主要研究领域为半导体器件建模和测试。E-mail: aozhang@ntu.edu.cn

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: jjgao@ee.ecnu.edu.cn

员将面临各种技术挑战与互连和封装相关的问题,例如随着频率的增加,键合线会引起显著的信号质量和损耗的反射和退化。因此,同年 IEEE 会刊对太赫兹频段封装技术进行了回顾和总结^[4],认为依赖于引线键合的传统方法不适用于太赫兹应用,金属分块封装具有电磁转换的方法提供卓越的性能,但体积庞大而且重量高,而微加工低温共烧陶瓷(Low Temperature Co-fired Ceramic, LTCC)技术能够实现分块结构,低成本且封装紧凑。

总之,毫米波太赫兹频段功率源和探测器,对于将来的 6G 无线通信应用越来越重要^[5-7],近年对砷化镓肖特基二极管的研究需要更加深入和细致,本文主要介绍肖特基二极管制作和主要性能指标,以及相应的器件表征方法和在片测试结构。

1 肖特基二极管器件结构

图 1 给出了 GaAs 肖特基二极管结构示意图,从图中可以看到主要有三个部分:阳极焊盘、阳极指和欧姆接触。常用的肖特基二极管结构主要包括表面沟道型二极管、空气桥型二极管和准垂直型二极管。图 2 给出了表面沟道平面二极管的结构,首先有弗吉尼亚大学的 Mattauch 教授团队完成,利用了砷化镓不同晶格平面的各向异性腐蚀,制造低寄生的平面二极管^[8]。采用空气桥的平面二极管如图 3 所示,该工艺的关键是构建一个坚固的空气桥。基于专门的光刻胶回流工艺以获得有助于升空桥梁臂并提供低寄生联络,形成阳极和空气桥同时,最大限度地减少错位和处理步骤。自对准单指(或多指)与阳极接触技术用以实现平面接触且易于与芯片电路集成的二极管^[9]。另外一种目前采用的二极管工艺技术,是基于准垂直几何结构(如图 4 所示),通过砷化镓与高电阻率硅的异质集成实现,可以用于亚毫米波应用。与平面二极管不同,该器件结构由二极管阳极的金属接触和外延台面组成,因此提供了大面积欧姆阴接触面积,准对称结构为肖特基二极管的散热和热管理提供了一种有效的方法^[10]。

2 等效电路模型

图 5 给出了一个典型的肖特基结二极管线性等效电路模型^[11],其中最重要的元件是寄生电阻 R_s ,它既影响器件的直流特性,又影响器件的高频特性。二极管线性等效电路模型是非线性模型对偏置电压的微分状态,其寄生部分保持不变,而本征

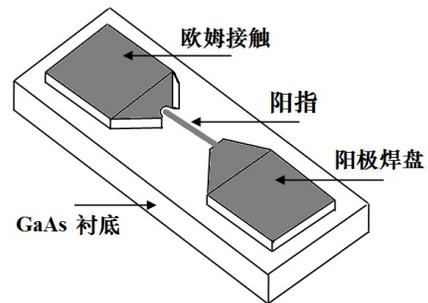
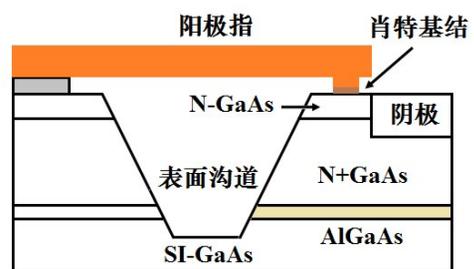
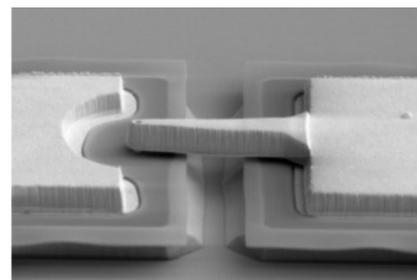


图 1 GaAs 肖特基二极管结构示意图

Fig. 1 The schematic diagram of GaAs Schottky diode structure



(a) 横截面



(b) 扫描电镜图

图 2 表面沟道平面二极管

Fig. 2 Surface channel planar diode (a) cross section (b) SEM image

网络由非线性电流和电荷变为电容和电导元件。

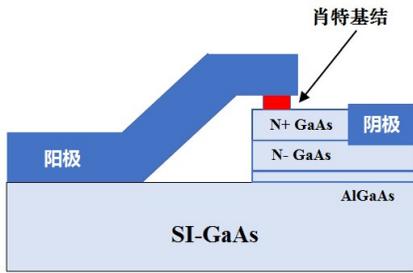
当肖特基二极管完全正向导通时,本征部分可以忽略不计,其等效电路模型如图 6(a)所示,相应的阻抗为:

$$Z_{on} = R_s \quad (1)$$

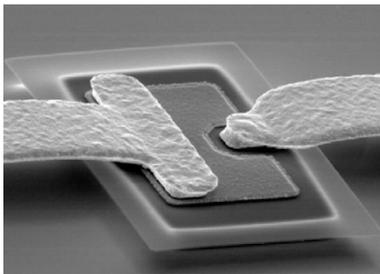
当肖特基二极管零偏置时,主要起作用的是肖特基结零偏电容,其等效电路模型如图 6(b)所示,相应的阻抗为:

$$Z_{off} = \frac{1}{j\omega C_{jo}} \quad (2)$$

因此肖特基二极管的截止频率定义为肖特基



(a) 横截面



(b) 扫描电镜图

图3 空气桥平面二极管

Fig. 3 Air-bridge planar diode (a) cross section (b) SEM image

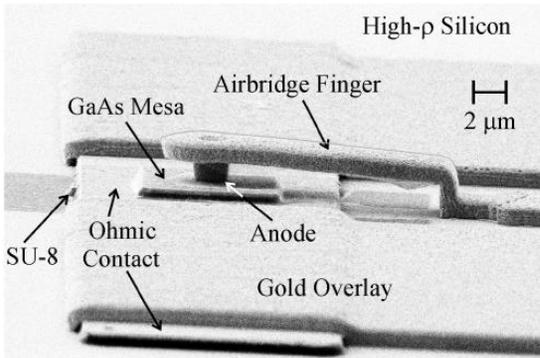


图4 维吉尼亚大学制作的准垂直二极管^[10]

Fig. 4 Quasi-vertical diode fabricated by University of Virginia^[10]

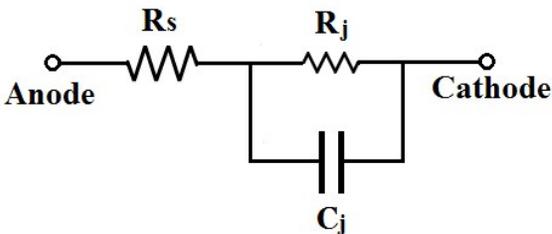


图5 肖特基二极管本征小信号等效电路模型

Fig. 5 Intrinsic small-signal equivalent circuit model of Schottky diode

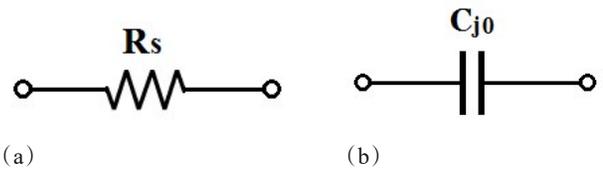


图6 肖特基二极管完全正向导通(a)和零偏置时的简化等效电路模型(b)

Fig. 6 Simplified equivalent circuit model of Schottky diode under full-conducting biased conduction (a) and zero bias conduction (b)

二极管完全正向导通时的阻抗幅度和肖特基二极管零偏置时阻抗幅度相等时的频率^[12]:

$$|Z_{on}| = |Z_{off}| \quad (3)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_s C_{j0}} \quad (4)$$

因此,从截止频率的定义来看,随着工作频率的提高,零偏置情况下的阻抗越来越小,当阻抗的幅度和寄生电阻一致时的频率就是器件的最大工作频率。图7给出了肖特基二极管的截止频率计算示意图。

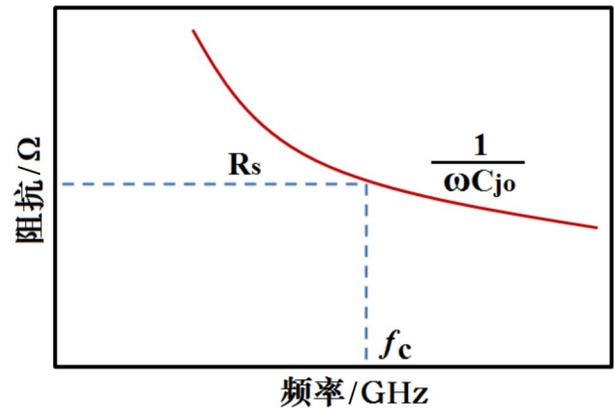


图7 肖特基二极管的截止频率

Fig. 7 Cutoff frequency of Schottky diodes

图8给出了截止频率随寄生电阻和零偏本征电容变化曲线,从图中可以看出,如果器件要工作在太赫兹频段,需要将器件寄生电阻控制在4~5欧姆,零偏本征电容控制在50 fF以下最好。

3 模型参数提取

肖特基二极管的在片测试通常分为以下三种情形:单口测试方法、双口串联测试方法和双口并联测试方法,具体情况需要依据版图设计的难易程

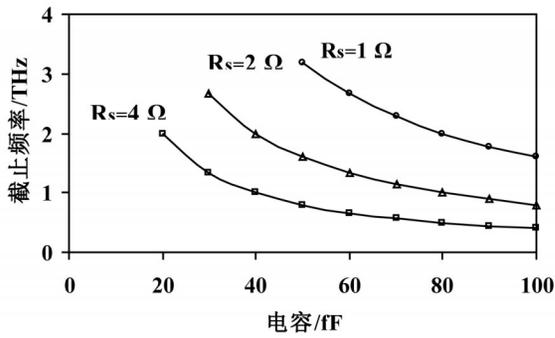


图 8 截止频率随寄生电阻和零偏本征电容变化曲线
Fig. 8 Cutoff frequency versus parasitic resistance and zero bias intrinsic capacitance

度来确定肖特基二极管的特性测试所需要设计的版图,值得注意的是S参数测试校准通常由矢量网络分析仪中的内置算法决定,如SLOT、TRL和LR-RM算法等等。

图9(a)给出了肖特基二极管单口测试方法原理图,将二极管看作一个一口网络,测试其端口反射系数,根据反射系数来确定二极管的阻抗。假设测试系统特征阻抗为 Z_o ,二极管阻抗为 Z_D ,则端口反射系数可以表示为:

$$S_{11} = \frac{Z_D - Z_o}{Z_D + Z_o} \quad (5)$$

则有:

$$Z_D = Z_o \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \quad (6)$$

图9(b)给出了一个实验室制作的肖特基二极管单口在片测试结构,相应的等效电路如图10所示,其中 C_p 表示焊盘电容, L_p 表示馈线电感, L_s 表示肖特基二极管空气桥电感。具体参数提取过程如下:

- 1) 利用N5247网络分析测试开路结构和短路结构的S参数^[13],确定焊盘电容和馈线电感。
- 2) 在削去焊盘电容和馈线电感之后,直接获得器件本征部分的网络参数。
- 3) 利用半分析方法确定器件本征模型参数^[14]。

图11给出了基于单口在片测试提取的寄生电感和电容数值,表1给出了相应模型参数。图12给出了单口测试模拟和测试S参数对比曲线,从图中可以看到在W波段以下模拟和测试吻合很好(导通状态绝对误差低于2.5%,截止状态绝对误差低于5%);在75 GHz以上精度有所下降,主要原因包括测试校准基片探针的老化以及构建模型需要考虑

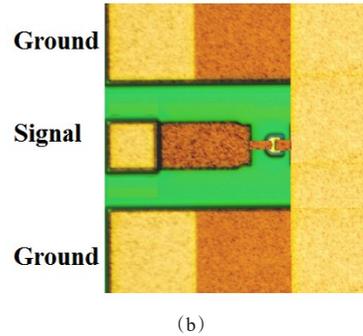
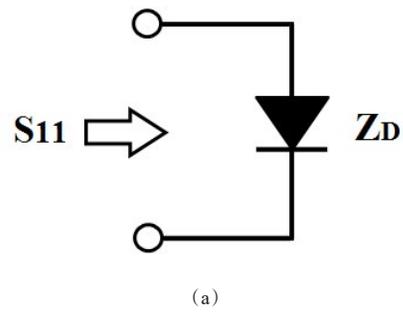


图 9 单口测试方法原理图和实际在片测试结构
Fig. 9 The schematic diagram of the one-port S-parameters measurement method (a) and on-chip test structure (b)

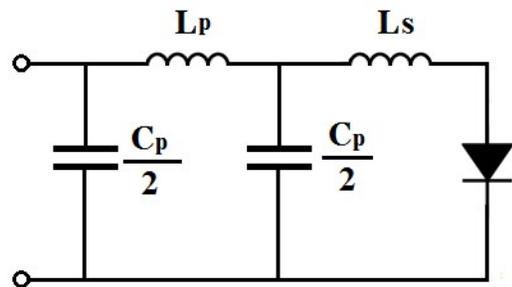


图 10 肖特基二极管单口在片测试等效电路模型
Fig. 10 Equivalent circuit model of Schottky diode for one-port S-parameters measurement

衬底基片的介电常数频率色散效应。

图13(a)给出了肖特基二极管双口串联测试方法原理图,将二极管看作一个二口网络,通过测试其二口S参数来确定二极管的阻抗。假设测试系统特征阻抗为 Z_o ,二极管阻抗为 Z_D ,则二口S参数可以表示为:

$$S_{11} = \frac{Z_D}{Z_D + 2Z_o} \quad (7)$$

$$S_{21} = \frac{2Z_o}{Z_D + 2Z_o} \quad (8)$$

则有:

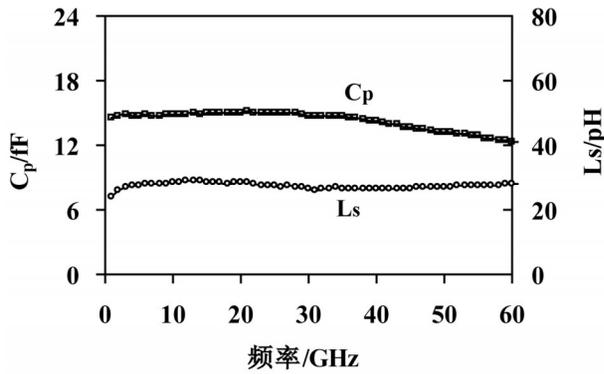


图 11 基于单口在片测试提取的寄生电感和电容数值
Fig. 11 Extracted parasitic inductance and capacitance based on the one-port S-parameters measurement

表 1 单口在片测试模型参数表

Table 1 Extracted model parameter based on the one-port S-parameters measurement

参数	0 mA	3.6 mA
C_p/fF	14	14
L_p/pH	28	28
L_s/pH	5	5
R_s/Ω	4	4
C_s/fF	10	-
R_s/Ω	-	8

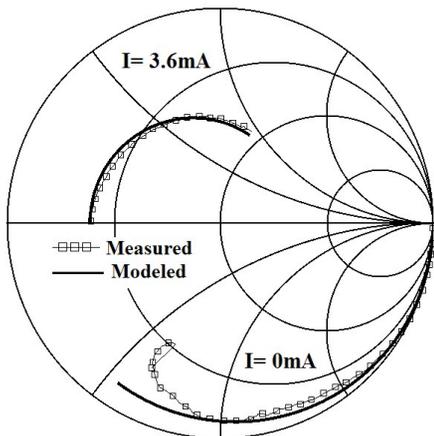
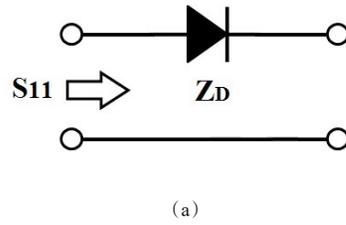


图 12 单口测试模拟和测试 S 参数对比曲线 (频率范围: 1~110 GHz)

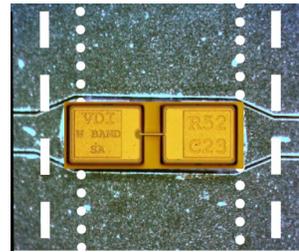
Fig. 12 Comparison between modeled and measured S-parameters of one-port S-parameters measurement (Frequency range: 1~110 GHz)

$$Z_D = 2Z_o \frac{S_{11}}{S_{21}} \quad (9)$$

其次,以一个测试实例来说明器件小信号模型参数的提取过程,该管芯为维吉尼亚二极管公司生产的商用肖特基二极管,利用倒装焊接的方式集成



(a)



(b)

图 13 双口串联测试方法原理图(a)和实际在片测试结构(b)
Fig. 13 The schematic diagram of the two-port series S-parameters measurement method (a) and on-chip test structure (b)

在石英衬底上,输入输出为共面波导结构,测试偏置为:0.1 mA 和 10 mA 两个偏置点,频率范围为 DC-75 GHz,测试结构示意图如图 13(b)所示^[15]。

图 14 给出了肖特基二极管的等效电路模型,其中 C_p 表示焊盘寄生电容, L_p 表示馈线电感, L_s 表示肖特基二极管的引线电感。

寄生电容 C_p 可以直接由截止条件下的 Y 参数获得:

$$C_p = \frac{1}{\omega} \text{Im}(Y_{11} + Y_{12}) \quad (10)$$

总的电感量可以直接由正向偏置条件下的 Y 参数获得:

$$L_t = 2L_p + L_s = \frac{1}{\omega} \text{Im}(1/Y_{12}) \quad (11)$$

具体参数提取过程如下:

1)测试开路结构和短路结构的 S 参数^[13],确定焊盘电容和馈线总的电感。

2)在削去焊盘电容之后,设置其余模型参数的初始值。

3)利用半分析方法确定器件本征模型参数^[14]。

图 15 给出了提取的寄生电容和电感随频率变化曲线,具体的模型参数如表 2 所示。图 16 给出了两个测试偏置下的模拟和测试 S 参数对比曲线,从

图中可以看到,在W波段以下模拟和测试吻合很好(导通状态绝对误差低于5%,截止状态绝对误差低于5%);我们发现在75 GHz以上模型精度有所下降,主要是商用器件倒装焊接在在片测试结构会带来较大的分布效应导致模型出现偏差。

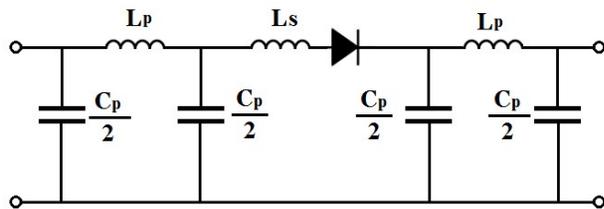


图14 双口测试肖特基二极管等效电路模型

Fig. 14 Equivalent circuit model of Schottky diode for two-port S-parameters measurement

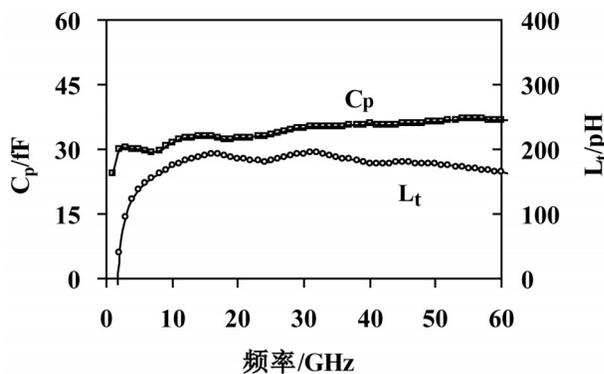


图15 基于双口测试提取的寄生电感和电容数值

Fig. 15 Extracted parasitic inductance and capacitance values based on the two-port S-parameters measurement

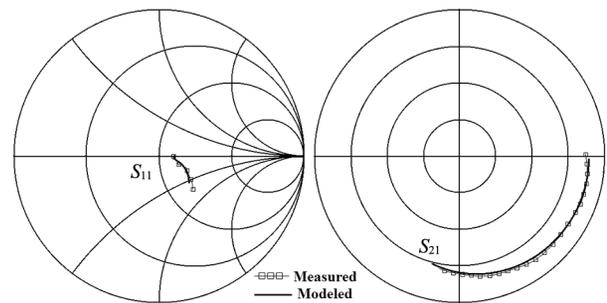
表2 基于双口测试的模型参数表

Table 2 Extracted model parameter based on the two-port S-parameters measurement

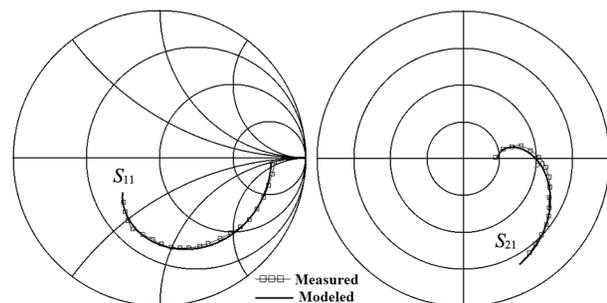
参数	100 μ A	10 mA
C_p /fF	35	35
L_p /pH	75	75
L_s /pH	45	45
R_s / Ω	4	4
C_j /fF	25	-
R_j / Ω	-	10

4 结论

本文主要介绍砷化镓材料毫米波频段二极管的制作和主要性能指标,介绍了器件表征方法和在片测试结构,包括单端口测试和双端口测试版图设计,最后利用实际测试实例对器件的小信号模型参数进行了提取,实验结果表明单口在片测试在1~



(a) 电流=10 mA



(a) 电流=0.1 mA

图16 模拟和测试S参数对比曲线(1~75 GHz)

Fig. 16 Comparison between modeled and measured S-parameters (Frequency range: 1~75 GHz) (a) Current=10 mA (b) Current=0.1 mA

110 GHz 频率范围内,导通和截止的S参数吻合较好;双口测试实例表明在1~75 GHz 频率范围内,导通和截止的S参数吻合较好。

References

- [1] References Young D T, Irvin J C. Millimeter frequency conversion using Au-n-type GaAs Schottky barrier epitaxial diodes with a novel contacting technique [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1965, **53**(12):2130-2131.
- [2] Crowe T W, Bishop, *et al.* Opening the terahertz window with integrated diode circuits [J]. *Solid-State Circuits, IEEE Journal of*, 2005, **40**(10):2104-2110.
- [3] Mehdi I, Siles J V, Lee C, *et al.* THz Diode Technology: Status, Prospects, and Applications [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2017:990-1007.
- [4] Song H J. Packages for Terahertz Electronics [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2017, **PP**(6):1-18.
- [5] Rappaport T S, Xing Y, Kanhere O, *et al.* Wireless communications and applications above 100 GHz: opportunities and challenges for 6G and beyond [J]. *IEEE Access*, 2019, **7**:78729-78757.
- [6] Ludwig R, Bretchko P. *RF circuit design: theory and applications* [M]. Person Education, Inc 2002.
- [7] Gao J. *Heterojunction Bipolar Transistor for Circuit Design-Microwave modeling and parameter extraction* [M]. Singapore: Wiley, 2015.

- [8] Bulcha B T, Hesler J L, Drakinskiy V, *et al.* 1.9–3.2 THz Schottky based harmonic mixer design and characterization [C]. 2015 European Microwave Conference (EuMC), Paris, France, 2015: 837–840.
- [9] Torkhov N A, Babak L I, Kokolov A. A Compact Model of Planar Schottky Diode with Anode Pin in a Form of Air Bridge with Whisker [C]. 2018 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), Omsk, Russia, 2018: 1–4.
- [10] Nadri S, Moore C M, Sauber N D, *et al.* Thermal Characterization of Quasi-Vertical GaAs Schottky Diodes Integrated on Silicon[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2019, **66**(1): 349–356.
- [11] HUANG H L, HUANG J, SHI Q. A parameter extraction method of the Schottky diode millimeter wave equivalent circuit model [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2021, **40**(6): 732–737.(黄惠琳,黄静,施隼.肖特基二极管毫米波等效电路模型参数提取方法[J].*红外与毫米波学报*), 2021, **40**(6): 732–737.
- [12] Champlin K S, Eisenstein G. Cutoff frequency of submillimeter Schottky barrier diodes [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1978, **26**(1): 31–34.
- [13] Zhang A, Gao J. A new method for determination of PAD capacitances for GaAs HBTs based on scalable small signal equivalent circuit model [J]. *Solid State Electronics*, 2018, **150**(8): 45–50.
- [14] ZHANG A, ZHANG Y X, WANG B R, *et al.* An approach to determine small-signal model parameters for InP HBT up to 110 GHz [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2018, **37**(6): 688–692.(张傲,张译心,王博冉,等.110 GHz 砷磷异质结双极晶体管小信号模型参数提取方法[J].*红外与毫米波学报*), 2018, **37**(6): 688–692.
- [15] Morales H, Dunleavy L and Skidmore S. Ultra-broadband characterization of Schottky diodes [C]. 79th ARFTG Microwave Measurement Conference, Montreal, QC, Canada, 2012: 1–4.