

文章编号: 2095-4980(2013)04-0646-04

GaAs 肖特基二极管中不连续性电路仿真分析

赵妍^{1a,1b}, 马毅超², 王雪敏^{1a,1b}, 阎大伟^{1a,1b}, 吴卫东^{1a,1b}

(1.中国工程物理研究院 a.激光聚变研究中心; b.太赫兹研究中心, 四川 绵阳 621999;
2.陕西科技大学 光电系, 陕西 西安 710021)

摘要: 在太赫兹技术应用系统中, 太赫兹混频器是太赫兹接收前端的关键部件, 而太赫兹肖特基二极管是太赫兹混频器的核心器件。本文采用信号完整性的方法对肖特基二极管在无源区的特性进行建模分析, 并对不连续性、寄生电容等参数进行分析。根据肖特基二极管设计的物理参数, 如尺寸、材料的介电常数等, 在高频结构仿真器(HFSS)中对肖特基二极管进行建模。通过多次建模仿真, 最终给出肖特基二极管的等效电路模型。通过对比 HFSS 中提取二极管欧姆焊盘的 S 参数和 Ansoft-designer 中对二极管欧姆焊盘的等效电路进行仿真得到的 S 参数, 证明了等效电路的合理性。该模型可以应用在对太赫兹混频器的电路级仿真中。

关键词: 太赫兹; 肖特基二极管; 信号完整性

中图分类号: TN304.07

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201304.0646

Analysis of the discontinuity in GaAs Schottky barrier diode based on the circuit module

ZHAO Yan^{1a,1b}, MA Yi-chao², WANG Xue-min^{1a,1b}, YAN Da-wei^{1a,1b}, WU Wei-dong^{1a,1b}

(1a.Research Center of Laser Fusion; 1b.Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China; 2. Department of Optoelectronics, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an Shaanxi 710021, China)

Abstract: Among variety THz application systems, the THz mixer is a key component of the receiver front-end, and the Schottky diode is the most important part of the mixer. This paper applies the integrity of signal to analyze the characteristics of Schottky diode. Based on analyzing the discontinuity of the pad and the parasitic capacity, a circuit based module is put forward. Then the model of Schottky diode is set up according to the designed physical parameters, including size, the dielectric constant of the material of the Schottky diode etc. The rationality of the equivalent circuit is proved by comparing the S parameter generated by High Frequency Structure Simulator(HFSS) and the simulation result of a circuit based model generated by Ansoft-designer. The model can be applied to the circuit-level simulation of terahertz mixer.

Key words: terahertz; Schottky barrier diodes; signal integrity

太赫兹波是指频率在 0.1 THz~10 THz 范围内的电磁波, 太赫兹波在天体物理、军事安全、医疗^[1-3]等方面有着重要应用。太赫兹波独特的特性使其在各学科领域都有独特的表现形式, 随着太赫兹波研究的不断深入, 太赫兹技术将有效地带动分子尺度物质研究技术的新发展^[4]。在文献[5]中提出了“肖特基二极管次谐波混频+中频信号 16QAM 高阶调制解调”的太赫兹通信系统技术路线, 并已经实现。GaAs 肖特基二极管(Schottky Barrier Diode, SBD)是目前常温下最好的太赫兹器件。在太赫兹波段, 有效频谱已经扩展至毫米波段, 波长和肖特基二极管的尺寸已经可以相比拟, 对比屏蔽腔体尺寸的减少, 二极管封装尺寸减小的幅度有限, 于是造成了二极管内部的封装等结构已经对二极管的电场分布造成了很大影响, 所以传统二极管模型以及二极管参数在太赫兹波段已经存在缺陷。本文采用信号完整性的方法对肖特基二极管在无源区的特性进行建模分析, 主要对肖特基二极管在无源区的不连续性、寄生电容等参数进行分析, 给出肖特基二极管的等效电路模型。

1 太赫兹频段二极管物理结构带来的影响

目前应用在太赫兹频段的二极管主要有触须接触式肖特基二极管和平台肖特基二极管。由于工艺原因,触须式肖特基二极管难以重复制作,可靠性差,并未在太赫兹频段得到广泛应用。平面肖特基二极管以其可靠性好,电路设计容易等优点在太赫兹器件上被广泛采用^[6]。

在太赫兹频段工作时(频段 120 GHz 对应工作波长为 2.5 mm),平面肖特基二极管的尺寸(0.3 mm×0.15 mm×0.1 mm)和工作波长可以比拟,此时二极管的封装、物理尺寸等特性已经影响到电场的分布。传统的仿真电路等效模型、SPICE 参数等已经不能准确地描述二极管在太赫兹频段下的工作特性了,应当对二极管的分布参数进行进一步的分析。

在无源部分,当肖特基二极管的尺寸和波长可以比拟时,二极管不能等效为集总模型。此时,二极管结构上的不连续性带来的特征阻抗 Z_0 的不连续会导致太赫兹波在二极管焊盘、接触指等部分发生反射。要对肖特基二极管在太赫兹下的特性进行准确的分析就必须考虑以上特性。

另外,由肖特基二极管结构所引起的寄生参量主要还有文献[7-9]中描述:二极管空气桥带来的电感 L_f ,空气桥和欧姆焊盘间的电容 C_{fp} ,二极管阳极焊盘和欧姆焊盘间的电容 C_{pp} ^[10]。同样,这些参数也可能影响肖特基二极管在太赫兹频段的特性。

VDI 公司的肖特基二极管实物图如图 1 所示,由图可以看出,不连续区域分为 2 部分,分别为欧姆焊盘和接触桥之间的不连续,欧姆焊盘本身的不连续,并且不连续区域的尺寸比工作频段的波长小很多。此时二极管的封装等会对二极管的频率特性带来比较大的影响。

可以对二极管欧姆焊盘和接触桥之间的不连续以及欧姆焊盘本身的不连续进行等效。二极管欧姆焊盘和接触桥之间的不连续性为阶梯性跳变。在此过程中由于阻抗的不连续会造成反射。根据文献[11]中对传输线的不连续性描述,同样对欧姆焊盘和接触桥之间的阶梯形跳变进行等效,等效电路图如图 2 所示。

根据文献[10-11]等效电路中各元件的计算公式如下:

$$\frac{C_s}{\sqrt{W_1 W_2}} = (4.368\epsilon_r + 2.33)W_2 / W_1 - 5.472 \ln \epsilon_r - 3.17 \tag{1}$$

$$L_1 = \frac{L_{w1}}{L_{w1} + L_{w2}} L_s \tag{2}$$

$$L_2 = \frac{L_{w2}}{L_{w1} + L_{w2}} L_s \tag{3}$$

式中 L_{w1}, L_{w2}, L_s 为:

$$L_w = Z_0 \sqrt{\epsilon_e} / c \tag{4}$$

$$\frac{L_s}{H} = 40.5 \left(\frac{W_2}{W_1} - 1 \right) - 32.57 \ln \frac{W_2}{W_1} + 0.2 \left(\frac{W_2}{W_1} - 1 \right)^2 \tag{5}$$

式中: W_1, W_2 为导带线宽; ϵ 为介质材料的介电常数; H 为 PCB 板的厚度; Z_0, c 分别为特征阻抗和真空中的光速。

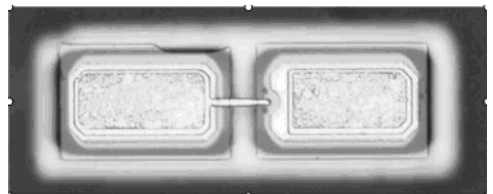


Fig.1 Picture of the planar SBD from VDI
图 1 VDI 公司平面肖特基二极管实物图

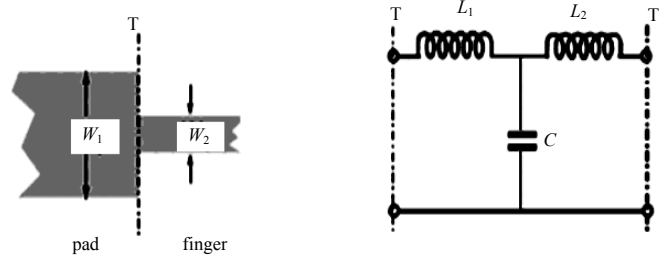


Fig.2 Circuit module of the discontinuity in transmission line
图 2 传输线的阶梯形不连续等效电路

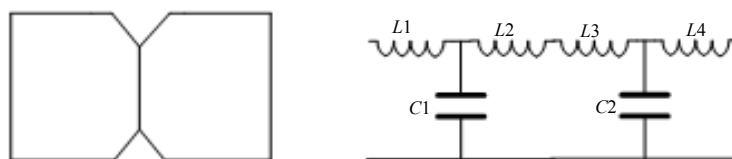


Fig.3 Discontinuity of the pads in the planar SBD and the equivalent circuit
图 3 平面肖特基二极管焊盘不连续性及其等效电路

对于二极管焊盘自身的不连续性,这种不连续如图 3 所示,为双斜切角跳变。对于双斜切角跳变可以等效为个数 n 趋近无穷大的阶梯型跳变的集合,并且每个阶梯型跳变的长度无限趋近于零,此时阶梯型跳变就演变成渐变型跳变。根据传输线不连续性以及文献[12-13]可以得出,2 个焊盘的斜切角跳变等效电路见图 3。

2 肖特基二极管 3-D 模型

要实现平面肖特基二极管的封装建模,首先应当了解肖特基的层次化结构模型,根据肖特基二极管的层次化结构对肖特基二极管进行建模。平面肖特基二极管的层次结构模型如图 4 所示,自下而上分别为:1) 砷化镓 GaAs 基片;2) n +GaAs 缓冲层,此层在 HFSS 中可以等效为理想导体 PEC;3) 砷化镓 GaAs 耗尽层;4) SiO_2 层;5) Cr-Au 欧姆接触层。

在 HFSS 建模过程中,为了加快仿真速度,根据文献[14],对平面肖特基二极管的各个层的介电常数进行等效近似。具体的等效值如表 1 所示。

根据表 1 的等效参数和二极管三维结构图,在 HFSS 中对平面肖特基二极管进行建模,模型如图 5 所示。

对欧姆焊盘的不连续性进行分析,在场仿真软件 HFSS 中根据欧姆焊盘的尺寸对焊盘进行建模,仿真条件为开放边界条件,以减少二极管周边因素对二极管无源部分特性的影响。为了逼近混频器中的真实使用情况,在二极管的两端焊盘分别加上一段特征阻抗为 $50\ \Omega$ 的微带线,并加上激励端口 1 和激励端口 2。根据图 2 中描述,在 Ansoft-designer 中对肖特基二极管欧姆焊盘的等效电路进行建模,并进行仿真,仿真得到的 S 参数曲线如图 6 所示。

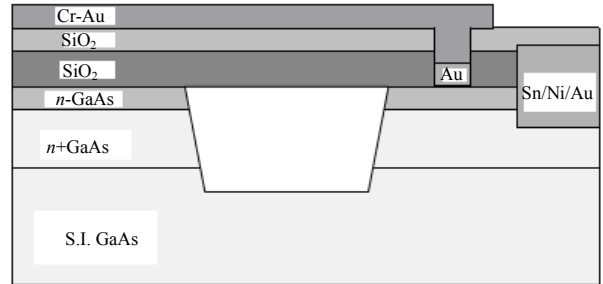


Fig.4 Physical structure of the planar Schottky barrier diode
图 4 平面肖特基二极管物理结构图

表 1 平面肖特基二极管在 HFSS 中的等效设置
Table1 Equivalent settings of the planar SBD in HFSS

region	equivalent settings in HFSS
n -GaAs layer	12.9
n +GaAs layer	perfect conductor
SiO_2 layer	4
pad,finger and anode	perfect conductor
GaAs layer	perfect conductor

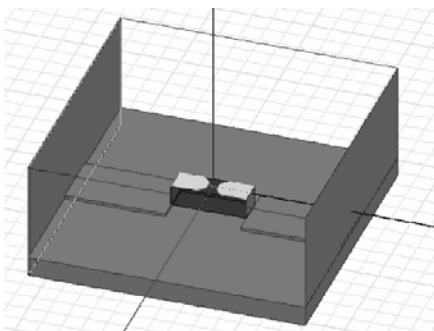


Fig.5 HFSS model of SBD
图 5 肖特基二极管 HFSS 模型

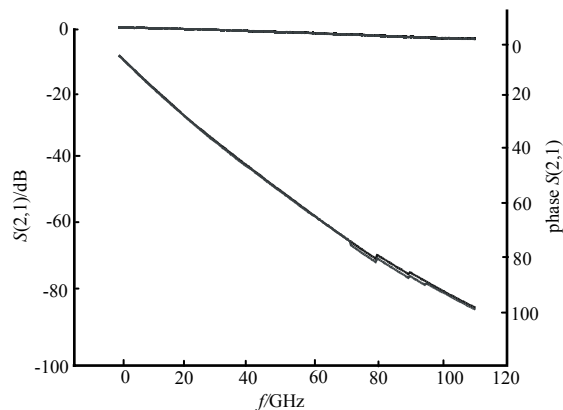


Fig.6 S -parameter of the SBD from HFSS model and its equivalent circuit
图 6 HFSS 模型 S 参数和电路模型 S 参数

从图 6 可以看出,等效电路模型和 HFSS 中的 3 维模型仿真结果在 $0\ \text{Hz}\sim 120\ \text{GHz}$ 范围内 S 参数曲线、幅度特性和相位特性吻合得较好,误差较小,且趋势保持一致。

3 结论

通过对平面肖特基二极管的无源区分别进行三维建模仿真、等效电路建模仿真,可以看出肖特基二极管的等效电路模型和三维模型仿真结果的 S 参数吻合较好。为今后进一步对太赫兹混频器进行分析、设计提供了准确的理论依据和电路模型。

参考文献:

- [1] Gulkis S, Allen M, Backus C, et al. Remote sensing of a comet at millimeter and submillimeter wavelengths from an orbiting space-craft[J]. Planetary and Space Science, 2007, 55(9):1050-1057.

- [2] Jacobs E, Moyer S, Franck C, et al. Concealed weapon identification using terahertz imaging sensors[C]// Terahertz for Military and Security Applications IV 2006. Orlando(Kissimmee), FL, USA: SPIE, 2006, 6212: 62120J.
- [3] Hubers H W. Terahertz heterodyne receivers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2008, 12(2): 378–391.
- [4] 杜宇, 张伟斌, 肖丽. 太赫兹检测技术在炸药检测中的应用[J]. 信息与电子工程, 2011, 9(3): 287–290. (DU Yu, ZHANG Weibin, XIAO Li. Application of terahertz wave technology in explosive analysis[J]. Information and Electronic Engineering, 2011, 9(3): 287–290.)
- [5] 王成, 刘杰, 邓贤进, 等. 0.14 THz 10 Gbps 无线通信系统[J]. 信息与电子工程, 2011, 9(3): 265–269. (WANG Cheng, LIU Jie, DENG Xianjing, et al. 0.14 THz 10 Gbps wireless communication system[J]. Information and Electronic Engineering, 2011, 9(3): 265–269.)
- [6] 杨晓帆. 基于平面肖特基二极管的太赫兹分谐波混频器研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012. (YANG Xiaofan. Study on terahertz subharmonic mixer based on the planar Schottky diode[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.)
- [7] David W Porterfield, Thomas W Crowe, Richard F Bradley, et al. A high-power fixed-turned millimeter-wave balanced frequency doubler[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(4): 419–425.
- [8] Xu Haiyong. Millimeter and submillimeter wave tunerless planar varactor frequency up converters[D]. Virginia: University of Virginia: School of Engineering and Applied Science, 2005.
- [9] David W Porterfield. High-efficiency terahertz frequency triplers[C]// Microwave Symposium, IEEE/MTT-S International. Honolulu: [s.n.], 2007: 337–340.
- [10] 姚常飞, 徐金平. 太赫兹 GaAs 肖特基二极管电路模型研究[C]// 2009年全国微波毫米波会议论文集. 上海: 中国电子学会微波分会, 2009: 1595–1597. (YAO Changfei, XU Jinping. Analysis and Modeling of GaAs Schottky Diodes for THz Application[C]// 2009 the national conference Microwave Millimeter Wave (the album). Shanghai: Microwave Society Institute of Electronics, 2009: 1595–1597.)
- [11] 张华. 高速互连系统的信号完整性研究[D]. 南京: 东南大学, 2005. (ZHANG Hua. Investigations on Signal Integrity of High-speed Interconnects and Systems[D]. Nanjing: Southeast University, 2005.)
- [12] Tang W, Chow Y L, Tsang K F. Different micro-strip line discontinuities on a single field-based equivalent circuit model[J]. Microwaves, Antennas and Propagation, 2004: 252–262
- [13] Silvester P, Benedek P. Micro-strip Discontinuity Capacitances for Right-Angle Bends, T Junctions, and Crossings[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1973, 21(5): 341–346.
- [14] MOU Jinchao, YU Weihua, Yuan Yong, et al. Design of a Compact Ka-band Balanced Mixer Based on a Novel Wide-band Equivalent Circuit of the Schottky Diode[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2011, 32(4): 466–481.

作者简介:



赵妍(1983–), 女, 石家庄市人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为低维纳米材料及半导体器件. email: zhaoyan267@163.com.

马毅超(1983–), 男, 西安市人, 博士, 讲师, 主要研究方向为信号完整性、IC设计及建模建库.

王雪敏(1976–), 男, 四川省泸州市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为量子级联激光器设计与实验研究.

吴卫东(1967–), 男, 武汉市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为薄膜的制备与性能研究.

阎大伟(1984–), 男, 河南省焦作市人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为半导体器件工艺研究.