文章编号: 2095-4980(2015)05-0679-05

# 截止频率 8.7 THz 的平面肖特基势垒二极管

李 倩 a,b, 安 宁 a,b, 童小东 a,b, 王文杰 a,b, 曾建平 a,b, 李志强 a,b, 唐海林 a,b, 熊永忠 a,b

(中国工程物理研究院 a.电子工程研究所; b.微系统与太赫兹研究中心, 四川 绵阳 621999)

摘 要:肖特基势垒二极管(SBD)具有强非线性效应、速度快及容易系统集成等特点,常用于 微波、毫米波及太赫兹波的产生和检测。本文通过电子束光刻等技术制作出肖特基接触直径 1 μm 的二极管,并对二极管进行了直流测试和射频测试。经过直流测试,二极管的串联电阻为 10.2 Ω, 零偏结电容为 1.76 fF,肖特基结截止频率达到了 8.7 THz;相同管子的射频测试串联电阻为 15.4 Ω, 零偏结电容 1.46 fF,肖特基结截止频率也达到了 7 THz。

关键词:太赫兹;肖特基势垒二极管;串联电阻;零偏结电容;截止频率 中图分类号:TN311<sup>+</sup>.7 文献标识码:A doi: 10.11805/TKYDA201505.0679

# Planar Schottky Barrier Diode with cut-off frequency of 8.7 THz

LI Qian<sup>a,b</sup>, AN Ning<sup>a,b</sup>, TONG Xiaodong<sup>a,b</sup>, WANG Wenjie<sup>a,b</sup>, ZENG Jianping<sup>a,b</sup>, LI Zhiqiang<sup>a,b</sup>, TANG Hailin<sup>a,b</sup>, XIONG Yongzhong<sup>a,b</sup>

(a.Institute of Electronic Engineering; b.Microsystem and Terahertz Research Centre, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

**Abstract:** A planar Schottky Barrier Diode(SBD) with the Schottky contact diameter of 1  $\mu$ m fabricated using electron beam lithography method is reported. The DC measurement results show that the DC series resistance, the junction capacitance and the cut-off frequency of SBD are 10.2  $\Omega$ , 1.76 fF and 8.7 THz, respectively; the RF extracted series resistance of 15.4  $\Omega$ , the junction capacitance of 1.46 fF and the cut-off frequency of 7 THz are also demonstrated.

Key words: terahertz; Schottky Barrier Diodes; series resistance; junction capacitance; cut-off frequency

肖特基势垒二极管(SBD)具有强非线性效应、速度快及容易系统集成等特点,常用于微波、毫米波及太赫兹 波的产生和检测,这类使用肖特基势垒二极管设计制作的倍频器和混频器有许多优点,如可在室温下工作、低噪 声温度、低变频损耗、可观的输出功率以及较高的工作带宽<sup>[1-7]</sup>。目前在太赫兹领域应用较广泛的是平面型肖特 基势垒二极管。VDI(Virginia Diodes Inc.)已经制作出截止频率大于 10 THz 的肖特基势垒二极管,最近中科院微 电子所也有做出截止频率为 3.37 THz 肖特基势垒二极管的报道<sup>[8-11]</sup>。本文基于太赫兹技术的应用需要,设计及制 作了一种平面肖特基势垒二极管,并经过直流和射频测试提取了关键参数(理想因子、串联电阻、结电容、寄生 电容和反向饱和电流),从而得到二极管的截止频率。

# 1 工艺制作

根据工艺线的实际加工能力,设计了肖特基势垒二极管的工艺流片版图及制作工艺流程,整个工艺流程主要 包括以下 6 个步骤,如图 1 所示。

1) 衬底准备

肖特基势垒二极管使用的材料衬底为半绝缘层,半绝缘层上先外延生长 N<sup>+</sup>-GaAs 层,厚度为 3.5  $\mu$ m,掺杂 浓度为 5.2×10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup>; 再外延生长 N<sup>-</sup>-GaAs 层,厚度为 100 nm,掺杂浓度为 2.9×10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup>。

2) 生长介质层

在半绝缘砷化镓衬底上依次外延生长 N<sup>+</sup>和 N<sup>-</sup>砷化镓外延层后,利用等离子增强化学气相沉积(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)淀积-层二氧化硅介质薄膜,厚度为 0.2 μm。

 $N^+$ 

sub

 $N^+$ 

sub

3) 欧姆接触制作

光刻欧姆接触区域,刻蚀掉二氧化硅介质膜,腐 蚀 N<sup>-</sup>-GaAs 外延层, 直到 N<sup>+</sup>-GaAs 外延层, 沉积 AuGe/Ni/Au 金属薄膜,剥离去胶后获得欧姆金属图 形,高温退火合金使金属和 N<sup>+</sup>-GaAs 外延层形成欧 姆接触,作为肖特基势垒二极管的阴极。

4) 肖特基接触制作

采用电子束光刻技术,光刻肖特基接触通孔图 形,直径为1µm。刻蚀二氧化硅介质膜后,沉积 Ti/Au 金属薄膜, 使之与 N<sup>-</sup>GaAs 外延层形成肖特基势垒接 触,作为肖特基势垒二极管的阳极。

5) 阴阳极电极 pad 制作

在二氧化硅上进行光刻,并与前面制作的欧姆接 触和肖特基接触金属套刻,保证阴极和阳极的良好引 出, 淀积 Cr/Au 金属薄膜, 剥离去胶后形成阴阳极电 极。pad 的制作基于 2 个目的: a) 用于直接扎针对 器件进行测试; b) 更重要的是为了在电路设计中引 出传输线,片上集成可以不做 pad。

6) 空气桥制作

空气桥作为平面肖特基势垒二极管的一个关键 设计,其目的是为了阻断阳极 pad 和阴极 pad 之间的

寄生电容通路,如图2所示,达到大幅降低 pad 间寄生电容,成 数量级提高截止频率的目的。空气桥的难度在于必须将空气桥下 面的外延层(厚度一般在数个微米)全部腐蚀直至半绝缘砷化镓 衬底,同时要保证空气桥上方细长的金属桥不断裂。在光刻形成 空气桥的掩蔽图形后,腐蚀去除二氧化硅介质薄膜,然后再使用 磷酸溶液腐蚀去掉空气桥下面的外延 N<sup>-</sup>-GaAs 层和 N<sup>+</sup>-GaAs 层, 最终完成肖特基二极管的流片工艺。最终制备出的平面肖特基二 极管的扫描电子显微镜照片如图 3 所示,可以看到该肖特基二极 管实现了空气桥结构。

#### 测试 2

完成综合流片后,对肖特基接触孔直径为1µm的 SBD 进行 了直流测试和射频测试,下面给出相同的二极管经过直流测试和 射频测试后的测试结果。

1) 直流测试

直流测试分为 I-U(电流-电压)测试和 C-U(电容-电压)测 试。由于  $\ln I = \ln I_s + qU/nkT$ ,其中, $I_s$ 是反向饱和电流,n为理想 因子, k 是玻尔兹曼常数, T 为温度。根据直流  $\ln I - U$  非线性区 拟合曲线(图 4)的斜率可得理想因子 n, 根据拟合曲线的截距可 得 I<sub>s</sub>; 由直流 C-U 测试, 提取出总电容 C<sub>total</sub> 和结电容 C<sub>i0</sub>, 通过 提取的串联电阻 R<sub>s</sub>和结电容 C<sub>i0</sub>,可以得到肖特基的结截止频率  $f_{T0}=1/(2\pi R_s C_{10})$ ,以及实际工作截止频率 $f_T=1/(2\pi R_s C_{total})$ 。

直流测试了 2 种结构(图 5)的 C-U 曲线, 分别是阴阳电极 pad 之间的 C-U 曲线(open 结构)和肖特基势垒二极管的 C-U 曲





Fig.3 SEM micrograph of the SBD 图 3 肖特基势垒二极管电镜照片

SiO2

线。当电压 U<0.5 V 时,器件尚未导通,此时,器件 C-U 曲线提取的总电容 C<sub>total</sub> 为零偏结电容(C<sub>i0</sub>)和 pad 间寄 生电容( $C_{open}$ )的并联,所以零偏结电容为 $C_{i0}=C_{total}-C_{open}$ ,测试结果如图 6 所示。

根据直流 *I-U* 测试和 *C-U* 测试提取的二极管参数如表 1 所示。根据截止频率计算公式可知,制备的平面肖特基势全二极管截止频率达到了 8.7 THz,总的寄生电容为 7.37 fF,二极管实际的工作频率也可达 2.11 THz。 阴阳极间 pad 对 pad 的寄生电容与 pad 的面积正相关,单管阴阳极两边引出 pad 尺寸比较大(40 μm×50 μm), 所以寄生电容相对较大,而受寄生电容的影响,实际工作频率与结截止频率相差比较大。如果将单管的 pad 尺寸 进一步减小,寄生电容将进一步减小,那么工作频率也将进一步提高。由于 pad 对 pad 的寄生电容可以优化,用 于片上集成时,空气桥可以直接连接外部电路的传输线,此时二极管的参数便可以和本征参数相比拟,工作截止 频率也将逼近本征截止频率。



### 2) 射频测试

研制的肖特基势垒二极管旨在太赫兹领域应用,而直流 I-U 测试提取的二极管串联电阻和寄生电容,没有考虑工作在高频下,管子的结电阻及寄生电容会因频率的变化以及趋肤效应等的影响而改变,因此,为了更加精确地提取高频下二极管的参数,对研制的二极管进行了射频测试,用来进一步验证其电学性能。为此建立了肖特基势垒二极管的射频等效电路,如图 7(a)所示。射频测试用到肖特基去嵌结构,包括 open 结构(图 7(b))和 through 结构(图 7(c),下简称 thru 结构)。其中 open 结构是指去掉肖特基结后器件的阴阳极部分; thru 结构是指将肖特基结短路后的器件。射频测试时主要测试肖特基势垒二极管的 S 参数、open 结构的 S 参数以及 thru 结构的 S 参数,通过以上 3 种结构测试结果,提取出串联电阻  $R_s$ 和结电容  $C_{j0}$ ,计算得到肖特基势垒二极管的截止频率  $f_T$ 。

对二极管进行射频扫描,射频扫描频率范围为 10 MHz~67 GHz。图 8 为射频测试的零偏二极管(端口 1,2)、 去嵌 open 结构(端口 3,4)和 thru 结构的 *S* 参数(端口 5,6),通过射频等效电路模型计算出二极管的零偏结电容  $C_{j0}$ 和串联电阻  $R_s$ ,如图 9 所示。

表 2 是相同二极管经过直流测试和射频测试 后二极管参数提取结果对比。从表 2 中的射频测 试提取的参数看,本次流片制作的二极管的结截 止频率达到7THz。对于串联电阻,直流测试提取 结果比射频测试提取结果要大,这是由于在高频 工作时, 高频信号趋肤效应等影响使得串联电阻 变大,进而导致截止频率比直流测试小。而射频 测试的零偏结电容比直流测试的要小,这是因为 高频趋肤效应使得电荷往材料表面积聚,相当于 结阴阳极接触的等效极板间的间距变大, 使得结 电容变小,从而使截止频率进一步减小。表 3 是 此次流片的二极管和同类型 VDI 的产品参数对 比,可以看出,本文研制的二极管与同类型 VDI 的二极管的电学性能相当。







10.0









Fig.9 Capacitance and series resistance extracted through measured S-parameters 图 9 通过测得的 S 参数计算出的二极管的零偏结电容 Cio 和串联电阻 Rs

私 J 口口至二00日多次/11	表 3	肖特基二极管参数对比
------------------	-----	------------

Table3 Parameters of SBD of different manufacturers							
samples	$R_{\rm s}/\Omega$	$C_{\rm total}/{\rm fF}$	$C_{\rm open}/{ m fF}$	$U/mV$ (forward current I=1 $\mu$ A)	$\Delta U/mV(100 \ \mu A-10 \ \mu A)$		
VDI product	13.0	7.50	3.50	520	72		
self-developed product	10.2	7.37	5.61	590	80		

# 3 结论

通过对肖特基二极管的单项工艺和综合流片工艺的开发,有效减小了肖特基二极管的串联电阻和寄生电容, 制作出串联电阻为 10.2 Ω,零偏结电容为 1.76 fF,直流测试结截止频率达到 8.7 THz 的肖特基二极管,且此类二 极管经射频测试的结截止频率也达到了 7 THz。该平面肖特基二极管工艺与现有的化合物半导体工艺兼容,可广 泛应用于片上集成和混合集成的太赫兹电路的设计与制造。

# 参考文献:

- [1] Porterfield D W. High-efficiency terahertz frequency triplers[C]// 2007 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium. Honululu,Hawaii,USA:[s.n.], 2007:337-340.
- [2] Jeffrey Lee Hesler. Planar Schottky diodes in submillimeter-wavelength waveguide receivers[D]. Virginia:University of Virginia, 1996.
- [3] QUN Xiao, Hesler J L, Crowe T W, et al. A 270 GHz tuner-less heterostructure barrier varactor frequency tripler[J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2007, 17(4):241-243.
- [4] Crowe T W, Peatman W C B, Bishop W L. GaAs Schottky Barrier Diodes for space-based applications at submillimeter wavelengths[C]// First International Symposium on Space Terahertz Technology. Ann Arbor, Michigan, USA:[s.n.], 1990:256-272.
- [5] Thomas B,Maestrini A,Beaudin G. A low-noise fixed-tuned 300-360 GHz sub-harmonic mixer using planar Schottky diodes[J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2005,15(12):865-867.
- [6] 王成,邓贤进,肖仕伟. 基于肖特基二极管的 140 GHz 次谐波混频器[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011,9(6):713-717.
   (WANG Cheng, DENG Xianjin, XIAO Shiwei. 140 GHz sub-harmonic mixer based on Schottky diode[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011,9(6):713-717.)
- [7] 王成,刘杰,吴尚昀,等. 140 GHz 关键射频组件研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011,9(5):564-568. (WANG Cheng, LIU Jie,WU Shangyun, et al. Research of 140 GHz critical RF components[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011,9(5):564-568.)
- [8] Peatman W C B,Crowe T W. Design and fabrication of 0.5 micron GaAs Schottky barrier diodes for low-noise terahertz receiver applications[J]. International Journal of Infrared & Millimeter Waves, 1990,11(3):355-365.
- [9] Bishop W L,Crowe T W,Mattauch R J,et al. Planar GaAs diodes for THz frequency mixing applications[C]// Third International Symposium on Space Terahertz Technology. Ann Arbor,Michigan,USA:[s.n.], 1990:600-615.
- [10] Alderman B, Henry M, Sanghera H, et al. Schottky diode technology at Rutherford Appleton Laboratory[C]// 2011 IEEE ICMTCE. Beijing, China: [s.n.], 2011:4-6.
- [11] 唐海林. 太赫兹肖特基二极管技术研究进展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(6):501-506. (TANG Hailin. Research progress of terahertz Schottky diodes[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(6):501-506.)

# 作者简介:



**李 倩**(1988-),女,陕西省渭南市人,硕 士,助理工程师,从事太赫兹器件的设计与工 艺研究.email:cjwzb163@163.com.

**安** 宁(1988-), 女,河北省邢台市人,硕士,研究实习员,从事太赫兹器件的设计与工艺研究.

**童小东**(1986-),男,四川省资阳市人,博士,助理研究员,从事半导体器件工艺及建模研究.

**王文杰**(1986-),男,湖北省仙桃市人,博士,助理研究员,从事半导体器件工艺研究.

曾建平(1986-),男,四川省简阳市人,博士,助理研究员,从事半导体器件设计及工艺研究.

**李志强**(1986-),男,四川省达州市人,博士,助理研究员,从事半导体器件设计及工艺研究.

**唐海林**(1979-),男,广西壮族自治区桂林市 人,硕士,高级工程师,从事半导体器件设计及 工艺研究.

**熊永忠**(1963-),男,湖北省仙桃市人,教授,博士生导师,从事微波毫米波、太赫兹集成电路 与器件研究.