

文章编号: 2095-4980(2013)06-0847-06

太赫兹肖特基二极管技术研究进展

唐海林

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 太赫兹肖特基二极管是太赫兹应用领域中非常重要的一种器件, 它可以实现高频信号的混频和倍频, 研制发展太赫兹肖特基二极管对于太赫兹技术有重要意义。本文首先介绍了太赫兹肖特基二极管的种类及性能表征, 接着介绍国内外主要研究机构在太赫兹肖特基二极管方面的研制成果和进展, 最后总结出研制太赫兹肖特基二极管的关键技术和发展方向。

关键词: 太赫兹; 肖特基二极管; 截止频率; 空气桥

中图分类号: TN911

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201306.0847

Research progress of terahertz Schottky diodes

TANG Hai-lin

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Terahertz Schottky diode is a very important device in terahertz application, which can be used to mix or multiply high frequency signals. The development of terahertz Schottky diode shows an important significance for the terahertz technology. The species and characteristics of terahertz Schottky diodes are introduced. The research results and progress in research institutions at home and abroad are described from the terahertz Schottky diode aspects. The key technologies and development trends of terahertz Schottky diode are summarized.

Key words: terahertz; Schottky diodes; cut-off frequency; air-bridge

由于肖特基二极管具有强非线性效应、速度快、常温工作及容易系统集成等特点, 因此截止频率达太赫兹频段的肖特基二极管, 可以实现高频信号的倍频或混频, 从而获得性能优良的太赫兹信号源和信号检测器^[1-7]。在此基础上可以进一步实现太赫兹信号发射和接收系统, 目前太赫兹肖特基二极管已经在太赫兹通信和雷达系统、太赫兹测量仪器以及地球物理和天文观测等领域中得到了广泛应用。本文首先介绍了太赫兹肖特基二极管的种类及表征其性能的主要技术指标, 接着介绍国内外主要研究机构在肖特基二极管方面的研究成果及进展, 最后总结出研制太赫兹肖特基二极管的关键技术及发展方向。

1 太赫兹肖特基二极管分类及性能表征

目前, 应用于太赫兹频段的太赫兹肖特基二极管基本上都是以高电子迁移率的砷化镓(GaAs)材料为基底, 通过外延生长不同掺杂浓度的外延层, 在阴极与金属形成欧姆接触, 在阳极与金属形成肖特基接触。结构上主要有 2 种结构形式, 分别为触须接触型肖特基二极管(Whisker-contacted Diodes)和平面型肖特基二极管(Planar Schottky Diodes), 如图 1 所示。

表征太赫兹肖特基二极管的技术参数有截止频率、串联电阻、结电容、寄生电容、正向开启电压、反向漏电流、正向饱和电流、理想因子等, 其中一些技术参数存在着内在的关系, 例如串联电阻与电容的乘积决定了肖特基二极管截止频率的大小。在这些技术参数中, 截止频率和正向饱和电流是最主要的技术参数, 截止频率表征了肖特基二极管的频率特性, 而正向饱和电流影响输出功率的大小。其他一些参数诸如串联电阻、结电容、寄生电容等在太赫兹肖特基二极管的使用过程中有着重要作用, 例如需要对二极管进行输入输出的阻抗匹配等方面, 同时也是设计太赫兹肖特基二极管过程需要优化的对象。其中太赫兹肖特基二极管的截止频率表示如下:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_s C_{\text{total}}} \quad (1)$$

式中: f_c 为太赫兹肖特基二极管的截止频率, R_s 为串联电阻, C_{total} 为总电容, 是肖特基二极管结电容与所有寄生电容之和。由式(1)可见, 要提高肖特基二极管的截止频率, 就需要减小其串联电阻和总电容^[8]。

触须接触型肖特基二极管在重掺杂(n^+ 层)砷化镓一面沉积金属形成欧姆接触作为阴极, 在轻掺杂(n^- 层)砷化镓一面沉积金属形成肖特基接触阵列, 在使用时金属触须式探针扎到肖特基结表面金属形成二极管的阳极。这种触须接触型肖特基二极管由于阳极金属电极面积很小, 电容非常小(约 0.5 fF), 截止频率可以做到 >10 THz, 但是这种肖特基二极管使用中装配难度大, 接触可靠性差, 难以与其他电路模块集成, 因此平面型太赫兹肖特基二极管被研发出来。平面型肖特基二极管采用全平面工艺制作, 可以与电路模块集成到一起, 所以可靠性好, 电路设计相对容易,

为增加功率容量, 还可被制作成阵列或者平衡式结构以满足不同电路结构的需要。但是通常这种平面型肖特基二极管由于阴、阳电极的存在, 寄生电容相对较大, 截止频率较低, 通过采用一些空气桥技术、集成技术和芯片减薄技术, 目前也可以把截止频率提高到近 10 THz。

2 国内外研究现状

国外开展太赫兹肖特基二极管研究的机构和单位主要有美国 VDI 公司(Virginia Diode Inc)、美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)、英国卢瑟福阿普尔顿实验室(Rutherford Appleton Laboratory, RAL)、法国光子学与纳米结构实验室(LPN)等。下面分别对这些研究机构研制的太赫兹肖特基二极管进行介绍。VDI 公司于 1996 年由 Thomas W. Crowe 博士成立, 1970 年~1996 年在维吉尼亚大学半导体器件研究室工作期间其研究小组就一直对太赫兹肖特基二极管持续进行研究(对触须接触型和平面型太赫兹肖特基二极管都有过相关研制)。VDI 公司最初以器件研究为主, 后面逐渐以利用其自主的太赫兹非线性器件发展出各种微波组件, 如混频器、倍频器、太赫兹频率源等。目前在各种组件中使用的肖特基二极管主要是平面型。VDI 公司的触须接触型和平面型肖特基二极管分别如图 2、图 3 所示。

VDI 公司触须接触型肖特基二极管阳极直径为 $0.5 \mu\text{m}$, 整个芯片尺寸为 $250 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m} \times 120 \mu\text{m}$ 。其材料体系为在重掺杂砷化镓衬底上(衬底掺杂浓度 $4.5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$)先外延 $1 \mu\text{m}$ 厚度的 n 型重掺杂缓冲层(掺杂浓度 $4.5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$), 然后再在缓冲层上外延 $0.1 \mu\text{m}$ 厚度的 n 型轻掺杂砷化镓(掺杂浓度 $4 \times 10^{17}/\text{cm}^3$)作为器件层。其工艺制作流程主要包括顶层砷化镓氧化物去除、低温沉积二氧化硅(SiO_2)钝化膜、光刻及等离子刻蚀(RIE)刻蚀阳极图形、芯片背面减薄、芯片背面欧姆接触制作、划片, 最后电镀阳极金属制作肖特基接触。直流测试结果显示该肖特基二极管串联电阻在 $33 \Omega \sim 35 \Omega$ 之间, 零偏结电容在 $0.45 \text{ fF} \sim 0.5 \text{ fF}$ 之间, 所以估算出器件的截止频率约为 10.6 THz。该类型须接触肖特基二极管被验证可用于 1 THz~3 THz 频率范围内的信号检测应用^[9-10]。

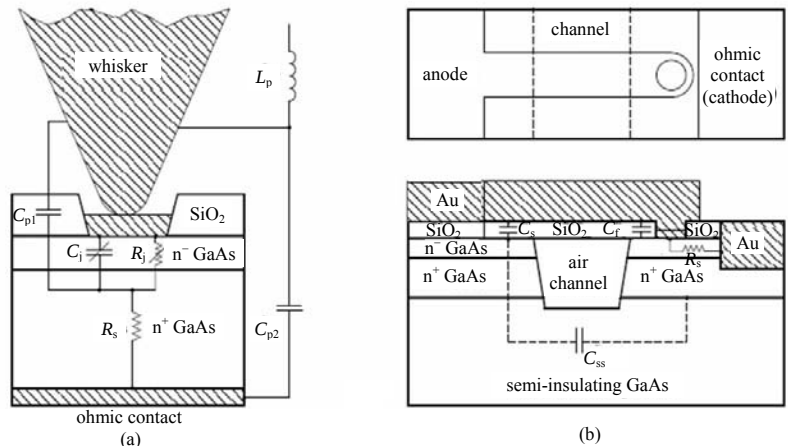


Fig.1 (a) Whisker-contact Schottky diode; (b) planar Schottky diode
图 1 (a) 触须接触型肖特基二极管; (b) 平面型肖特基二极管

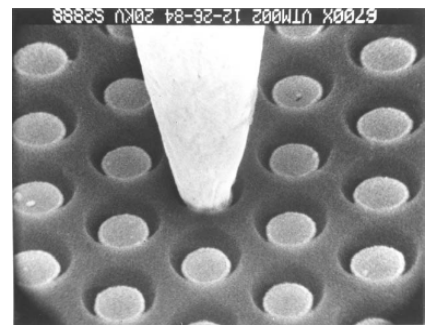


Fig.2 Whisker-contact Schottky diode in VDI
图 2 VDI 触须接触型肖特基二极管

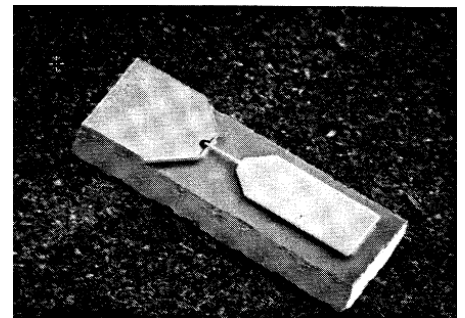


Fig.3 Planar Schottky diode in VDI
图 3 VDI 平面型肖特基二极管

VDI 公司平面型肖特基二极管采用半绝缘砷化镓(GaAs)材料为基底,在基底上依次外延生长重掺杂 n^+ 过渡层和轻掺杂 n^- 层。在轻掺杂 n^- 层表面沉积二氧化硅层作为钝化和绝缘层并图形化,蒸发金属形成肖特基接触作为二极管正极,在正极的旁边制作欧姆接触作为二极管的负极。二极管正极通过一根很细的梁引线与压焊区相连接,可通过深刻蚀把梁引线下的砷化镓(GaAs)刻蚀至基底一定深度形成深槽,使得梁引线悬空形成空气桥(Air-bridge)结构,深槽尽可能靠近肖特基结区增加空气桥的长度。通过这种设计和加工,可有效减小平面型肖特基二极管的并列电容,从而提高工作频率。这种平面型肖特基二极管以 VDI-SC2T6 为例,其尺寸为 $200\text{ }\mu\text{m}\times 80\text{ }\mu\text{m}\times 55\text{ }\mu\text{m}$,串联电阻最大 $4\text{ }\Omega$,零偏总电容最大 10 fF ,器件的截止频率约为 4 THz 。对于不同的应用,VDI 公司发展出一系列的平面型太赫兹肖特基二极管,如反向并联肖特基二极管、串联肖特基二极管等^[11-12]。

美国喷气推进实验室(JPL)也开展了类似的平面型太赫兹肖特基二极管研究,具备很高的技术水平,但从未商用化,主要用于天文观测。JPL 实验室研制的平面型肖特基二极管采用一种名为单片薄膜二极管工艺(Monolithic Membrane-diode Process)的方法制作,把肖特基二极管与混频电路和倍频电路集成制作在一层厚度为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的砷化镓(GaAs)薄膜上,薄膜由四周厚度为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 砷化镓(GaAs)框架支撑。后来为了增加电路设计灵活性,增加与波导匹配应用的可行性,减小芯片尺寸面积等方面考虑,甚至把四周 $50\text{ }\mu\text{m}$ 厚度的砷化镓(GaAs)框架支撑也完全去除,整个混频器或倍频电路都集成在一层宽 $30\text{ }\mu\text{m}$,厚度 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的砷化镓(GaAs)薄膜上。JPL 实验室研制的混频电路和倍频电路中使用到的肖特基二极管接触面积为 $0.14\text{ }\mu\text{m}\times 0.6\text{ }\mu\text{m}$,同样采用类似 VDI 公司的空气桥结构,而且由于把二极管与混频电路和倍频电路集成到一起,去除了大的阴阳极金属电极,极大地减小了寄生电容,因此可提高肖特基二极管的截止频率。JPL 实验室研制的 2.5 THz 框架式和无框架式薄膜混频电路分别如图 4、图 5 所示^[13-15]。

英国卢瑟福阿普尔顿实验室(RAL)最初是利用商业化的太赫兹肖特基二极管开展肖特基接收机技术研究,随着研究的进展,从 2004 年开始,卢瑟福阿普尔顿实验室开始建立自己的肖特基二极管工艺制作洁净室,分别于 2007 年和 2009 年第一次报道了自己研制的混频器和倍频器成果。卢瑟福阿普尔顿实验室研制的太赫兹肖特基二极管采用类似 VDI 公司的平面型结构,空气桥技术减小寄生电容,肖特基接触直径在 $1\text{ }\mu\text{m}\sim 2\text{ }\mu\text{m}$ 之间,探针台测试串联电阻 $1\text{ }\Omega$,其研制的肖特基二极管在 $160\text{ GHz}\sim 380\text{ GHz}$ 频率范围内进行了混频测试。同时为了提高工作频率,卢瑟福阿普尔顿实验室也开发了类似于美国喷气推进实验室的薄膜二极管结构,把肖特基二极管和混频电路集成到一层厚度为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的 GaAs 薄膜上,实现了 500 GHz 的次谐波混频,在最新的文献中,卢瑟福阿普尔顿实验室首次验证了 2.5 THz 波导二极管混频器。卢瑟福阿普尔顿实验室研制的太赫兹肖特基二极管和薄膜混频电路分别如图 6、图 7 所示^[16-18]。

法国光子与纳米结构技术实验室(LPN)的 Cécile Jung 等与巴黎天文台 LERMA 部门合作设计制作了自己的混频 Beam-lead 肖特基二极管,LPN 肖特基二极管的结构如图 8 所示。

LPN 的肖特基二极管基于电子束光刻和传统的外延层设计,初始材料为 $500\text{ }\mu\text{m}$ 厚的半绝缘 GaAs,通过金属-有机物化学气相沉积(MOCVD)或者是分子束外延(MBE)制作外延层。首先在半绝缘砷化镓(GaAs)上制作 $400\text{ nm AlGaAs}+40\text{ nm GaAs}+400\text{ nm AlGaAs}+40\text{ nm GaAs}$,然后在其上制作 $40\text{ nm AlGaAs}+800\text{ nm}$ 重掺杂($5\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$) n^+ 缓冲(buffer)层+ 100 nm 轻掺杂($1\times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$) n^- 型外延层。

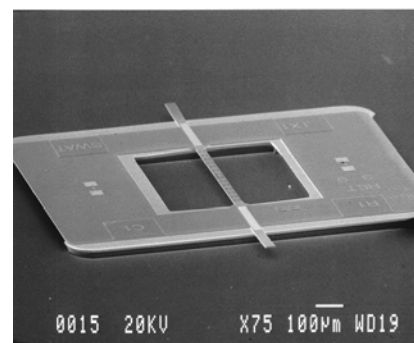


Fig.4 JPL 2.5 THz frame membrane mixer
图 4 JPL 2.5 THz 框架式薄膜混频电路

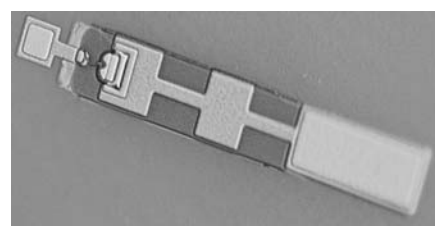


Fig.5 JPL 2.5 THz frameless membrane mixer
图 5 JPL 2.5 THz 无框架式薄膜混频电路

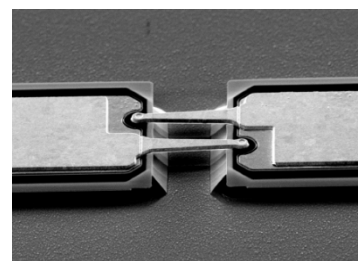


Fig.6 RAL anti-parallel diode pair
图 6 RAL 反向并联肖特基二极管

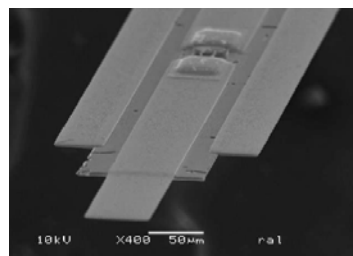


Fig.7 Membrane diode structure with beam-leads
图 7 RAL 500 GHz 次谐波薄膜混频电路

器件区域由选择性的 AlGaAs/GaAs 湿法蚀刻来实现,欧姆接触由镍/锗/金金属薄片构成,肖特基接触和电极由钛/金金属薄片构成,使用等离子体化学气相沉积制作氮化硅钝化层。为了方便集成到外部电路上,使用电感耦合等离子体对整个圆片进行深度干法刻蚀以分离出二极管芯片,不过 LPN 没做到完全抛弃半绝缘 GaAs 基底,该层仍然有 $10\ \mu\text{m}$ 或 $50\ \mu\text{m}$ 厚。LPN 研制的二极管肖特基接触面积 $0.8\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$, 串联电阻约 $10\ \Omega$, 用于 $330\ \text{GHz}$ 混频器^[19-21]。

除了上述机构对太赫兹肖特基二极管研究时间比较长,技术力量领先外,还有一些机构和大学也有相关的研究文献报道。例如联合单片半导体公司(UMS)也提供了一种商业肖特基二极管工艺,这种工艺不能为阳极提供空气桥,所以该二极管很难在超过 $180\ \text{GHz}$ 的器件中使用^[22],主要用于射频领域;意大利光子学与纳米技术研究所也研制了用于太赫兹成像的肖特基二极管^[23];德国达姆施塔特技术大学高频技术研究所研制的肖特基二极管采用垂直结构,这种结构与触须接触二极管类似^[24]。

目前国内研究太赫兹肖特基二极管的单位还不多,起步时间也比较晚,有 2 个单位进行了相关报道和论文发表。其中由北京理工大学设计,中国电子科技集团公司第 13 研究所流片制作的平面型肖特基二极管经测试串联电阻 $20\ \Omega$, S 参数测试提取总电容 $10.8\ \text{fF}$, 推算出截止频率 $650\ \text{GHz}$, 研制的肖特基二极管如图 9 所示^[25]。

中科院微电子所也已经开展肖特基二极管方面的研究,最近报道了截止频率达到 $3.37\ \text{THz}$ 的肖特基二极管研究成果,图 10 为其研制的肖特基二极管的 SEM 照片。

3 关键技术

太赫兹肖特基二极管的工作原理简单,结构不复杂,但要研制出满足高频应用要求且具有一定的转换效率难度较大,因此在太赫兹肖特基二极管的研制过程中,需要解决以下关键技术。

1) 太赫兹肖特基二极管设计技术。

太赫兹肖特基二极管设计技术包括了肖特基势垒半导体理论计算及仿真、基于载流子运动方程的肖特基结非线性特性计算及仿真、最小化寄生参量的二极管外围结构设计及电磁学设计仿真。上述计算仿真需要对肖特基二极管的材料参数、物理结构形式、几何尺寸等进行模拟优化,从而获得最终的器件制作参数。

2) 太赫兹肖特基二极管工艺制作技术

太赫兹肖特基二极管由于需要工作到很高的频率,因此对器件的尺寸例如阳极接触面积、芯片厚度、电极尺寸等都要求非常严格,给工艺制作带来很大挑战。要提高肖特基二极管截止频率,这就需要在外延生长中严格控制材料参数,工艺流片中制备获得良好的肖特基势垒接触和欧姆接触,阳极接触面积严格控制在设计范围之内,芯片厚度尽可能减薄,制备结构可靠的空气桥等。只有解决这些流片工艺过程的关键技术,才能制备出满足要求的太赫兹肖特基二极管。

3) 太赫兹肖特基二极管性能测试及参数提取技术

肖特基二极管完成制作后需要设计出测试方案,测试其直流、交流特性,以获得 $I-V$ 、 $C-V$ 特性,从 $I-V$ 、 $C-V$ 特性中提取出肖特基二极管的理想因子 n 、串联电阻 R_s 、饱和电流 I_s 、零偏置结电容 C_{j0} 等二极管参数,并应用高频测试,如 S 参数测试法对寄生参数进行提取。利用所有提取参数,建立起肖特基二极管的等效电路模型,并反馈到设计仿真,重新调整优化器件参数,最终获得满足太赫兹频段混频、倍频应用的肖特基二极管器件和模型。

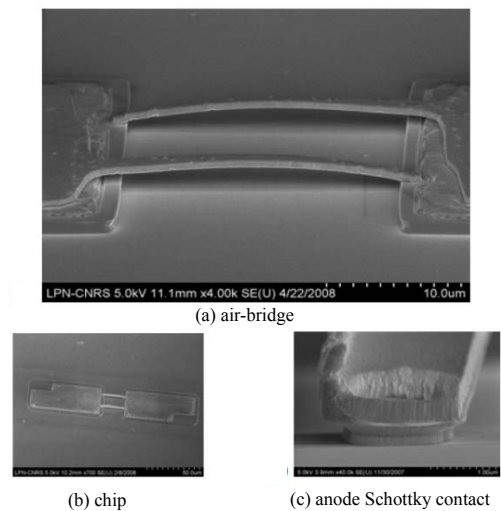


Fig.8 SEM of Schottky diode in LPN
图 8 LPN 的 Beam-lead 肖特基二极管

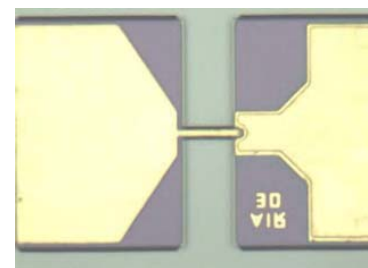


Fig.9 Photo of Schottky diode in Beijing institute of technology
图 9 北京理工大学研制的肖特基二极管图片

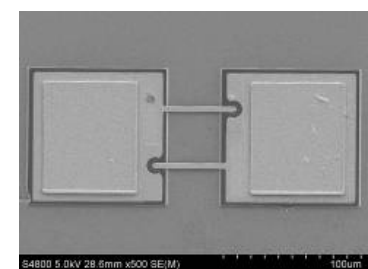


Fig.10 Photo of Schottky diode in IMECAS
图 10 微电子所研制的肖特基二极管图片

4 结论

太赫兹肖特基二极管是太赫兹电子学应用领域中非常重要的基础器件,其可广泛应用于混频、倍频、检测等方面。欧美发达国家在太赫兹技术及太赫兹肖特基二极管研制方面都处于技术领先水平,其中太赫兹肖特基二极管研制在20世纪90年代就已相当成熟,国内在太赫兹技术及器件方面的研究起步较晚,对于太赫兹肖特基二极管的需求主要还依赖于国外进口,因此需要加快研制的速度,追赶上国外的先进技术。

研制太赫兹肖特基二极管以高电子迁移率的砷化镓材料为主,采用外延工艺精确控制器件层的掺杂浓度及厚度,从发展趋势来看,平面型肖特基二极管是发展的主要方向,且随着频率的提高,分离器件的肖特基二极管已经很难满足应用的要求,其寄生参量严重制约了工作频率的提高,因此把肖特基二极管和各种功能的电路集成到一起是一种有效的方法,但同时对制作工艺也提出了更高的要求。

参考文献:

- [1] David W Porterfield. High-Efficiency Terahertz Frequency Triplers[C]// IEEE MTT-S International. Microwave Symposium. Honolulu, Hawaii: IEEE, 2007: 337-340.
- [2] Jeffrey Lee Hesler. Planar Schottky Diodes in Submillimeter-wavelength Waveguide Receivers[D]. Charlottesville, Virginia: University of Virginia, 1996.
- [3] Qun Xiao, Jeffrey L Hesler, Thomas W Crowe, et al. A 270-GHz Tuner-Less Heterostructure Barrier Varactor Frequency Tripler[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2007, 17(3): 241-243.
- [4] Thomas W Crowe, 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: University of Michigan, 1990: 256-272.
- [5] Bertrand Thomas, Alain Maestrini, Gérard Beaudin. A Low-Noise Fixed-Tuned 300-360GHz Sub-Harmonic Mixer Using Planar Schottky Diodes[J]. IEEE Microwave and 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] 施敏, 伍国钰. 半导体器件物理[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2008. (SHI Min, WU Guoyu. Physics of Semiconductor Devices[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2008.)
- [9] Bishop W L, McKinney K, Mattauch R J, et al. A novel whiskerless diode for Schottky and submillimeter wave applications[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Las Vegas, Nevada: IEEE, 1987: 607-610.
- [10] William C B Peatman, Thomas W Crowe. Design and Fabrication of 0.5 Micron GaAs Schottky Barrier Diodes for Low-Noise Terahertz Receiver Applications[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1990, 11(3): 355-365.
- [11] William L Bishop, Thomas W Crowe, Robert J Mattauch, et al. Planar GaAs Diodes for the Frequency Mixing Applications[C]// Third International Symposium on Space Terahertz Technology. Ann Arbor, Michigan: [s.n.], 1990: 600-615.
- [12] Virginia Diodes Inc. Your Source for Terahertz and mm-Wave Products[EB/OL]. <http://www.vadiodes.com>.
- [13] Jean Bruston, Suzanne Martin, Alain Maestrini, et al. The Frameless Membrane: A Novel Technology for THz Circuits[C]// Eleventh Int'l Conference on Space THz Tech. Ann Arbor: [s.n.], 2000: 277-286.
- [14] Peter H Siegel, Peter Smith R, Michael C Gaidis, et al. 2.5-THz GaAs Monolithic Membrane-Diode Mixer[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(5): 596-604.
- [15] Jean Bruston, Peter Smith, Imran Mehdi, et al. Analysis and optimization of planar rectangular 11-anode Schottky barrier diodes for submillimeter-wave multipliers[C]// 26th EuMC. Prague, Czech: [s.n.], 1996: 300-304.
- [16] Alderman B, Sanghera H, Henry M, et al. Schottky Diode Technology at the Rutherford Appleton Laboratory[C]// IEEE International Conference on Microwave Technology & Computational Electromagnetics (ICMTCE). Beijing: IEEE, 2011.
- [17] Brian Movna. Terahertz Developments at STFC Rutherford Appleton Laboratory[R]. Oxfordshire, United Kingdom: STFC Rutherford Appleton Laboratory.
- [18] Ellison B N, Madelison B J, Mann C M, et al. First Results of a 2.5 THz Schottky Diode Waveguide Mixer[C]// Seventh International Symposium on Space Technology. Charlottesville: [s.n.], 1996: 494-502.

- [19] Jung C,Wang H,Maestrini A,et al. Fabrication of GaAs Schottky nano-diodes with T-anodes for submillimeter wave mixers[C]// 19th International Symposium on Space Terahertz Technology. Groningen, Netherlands:[s.n.], 2008:28–30.
- [20] Cecile Jung,Alain Maestrini,Antonella Cavanna,et al. Conception and Fabrication of GaAs Schottky diodes for Mixers[C]// 20th International Symposium on Space Terahertz Technology. Charlottesville:[s.n.], 2009:255–256.
- [21] Alain Maestrini,Bertrand Thomas,Hui Wang,et al. Schottky diode based terahertz frequency multipliers and mixers[J]. Comptes Rendus de l'Academie des Sciences–Physique, 2010,11:480–495.
- [22] Maestrini A,Thomas B. Report on the evaluation of the capabilities of the united monolithic semiconductors to produce Schottky diodes based mixers in the band 100–380 GHz[J]. Proceedings of the round table discussion on Schottky technology, The Netherlands, 2004.
- [23] Giovine E,Casini R,Dominijanni D,et al. Fabrication of Schottky diodes for terahertz imaging[J]. Microelectronic Engineering, 2011,88:2544–2546.
- [24] Andrzej Jelenski,Andreas Griib,Viktor Krozer,et al. New Approach to the Design and the Fabrication of THz Schottky Barrier Diodes[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1993,41(4):549–557.
- [25] Mou Jinchao,Yuan Yong,LV Xin,et al. Design and Fabrication of planar GaAs Schottky Barrier Diodes for Submillimeter-wave Applications[C]// International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Chengdu:[s.n.], 2010: 1746–1749.

作者简介:



唐海林(1979–), 男, 广西壮族自治区桂林市人, 硕士, 研究方向为太赫兹半导体器件及工艺.email: hailint@qq.com.

(上接第 846 页)

- [4] 林元根,张勇. 亚毫米波二倍频器的设计[J]. 舰船电子对抗, 2010,33(4):102–111. (LIN Yuangeng,ZHANG Yong. Design of Sub-millimeter Wave Double Frequency Multiplier[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2010,33(4):102–111.)
- [5] 陈振华,徐金平. W 波段宽带三倍频器研究[C]// 2011 年全国微波毫米波会议论文集(下册). 山东,青岛:[s.n.], 2011: 1062–1065. (CHEN Zhenhua,XU Jinping. W band Frequency Tripler for Broadband Operation[C]// 2011 national conference of microwave and millimeter wave. Qingdao,Shandong:[s.n.], 2011:1062–1065.)
- [6] 晏志祥. W 波段高效倍频技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2011.(YAN Zhixiang. W band high efficiency multiplying techniques research [D]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China, 2011.)
- [7] 缪丽,邓贤进,熊祥正,等. 0.14 THz 倍频器的仿真与设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012,10(6):689–694. (MIAO Li,DENG Xianjin,XIONG Xiangzheng,et al. Design and simulation of 0.14 THz frequency doubler[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012,10(6):689–694.)
- [8] 刘伟,张勇,卢秋全,等. D 频段新型二倍频器设计[J]. 微波学报, 2013,29(2):21–29. (LIU Wei,ZHANG Yong,LU Qiuquan, et al. Design of a Novel D-Band Frequency Doubler[J]. Journal of Microwaves, 2013,29(2):21–29.)

作者简介:



王 成(1987–), 男, 四川省射洪县人, 硕士, 研究实习员, 主要研究方向为电磁场理论与仿真技术、太赫兹通信技术、太赫兹关键器件和毫米波组件与电路.email:c-w04@63.com.

蒋 均(1987–), 男, 重庆市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹非线性器件和毫米波组件与电路.

缪 丽(1986–), 女, 四川省绵阳市人, 硕士, 主要研究方向为太赫兹非线性器件和毫米波组件与电路.

邓贤进(1973–), 男, 四川省安岳县人, 研究员, 主要研究方向为电磁场理论、仿真技术、微波技术、收发信道系统技术、通信系统技术等.