Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2016)05-0668-05

基于平面肖特基二极管的 W 波段检波器

刘海瑞¹, POWELL Jeff², VIEGAS Colin², ALDERMAN Byron², 俞俊生¹

(1.北京邮电大学 信息与通信工程学院, 北京 100876; 2.Teratech Components Limited, OX11 0QX, UK)

摘 要: 肖特基二极管技术为常温下毫米波信号的检测提供了有效的解决方案。它具有极低的寄生电容和级联电阻,可用于该频段的倍频器、混频器和检波器当中。相比于 Galey Cell 和热辐射测定器(Bolometer),基于肖特基二极管的直接检波技术具有低噪声、高反应率和常温使用的特点。本文介绍了一种基于波导结构的零偏置肖特基二极管检波器,采用 E 面探针传输波导基模电磁波,通过阻抗匹配实现微带线到二极管的耦合。测试结果表明,在-30 dBm 输入功率下: 电压反应率的峰值可达 8 900 V/W; 在 75 GHz~105 GHz 的频率范围内,电压反应率在 1 000 V/W 以上。

关键词: 毫米波; 平面肖特基二极管; W 波段; 直接检波器; 电压反应率 中图分类号:TN722.7 **文献标识码:**A **doi**:10.11805/TKYDA201605.0668

W band detector based on planar Schottky diode

LIU Hairui¹, POWELL Jeff², VIEGAS Colin², ALDERMAN Byron², YU Junsheng¹

(1. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;
 2.Teratech Components Limited, OX11 0QX, UK)

Abstract: Schottky diodes technology provides an efficient solution for millimeter wave detection under room temperature. It offers low parasitic capacitance and series resistance when used as mixers, multipliers and detectors. Some Schottky detectors can operate under room temperature and have an extremely fast response compared with other detectors, such as micro-bolometers and Golay cells. A zero biased waveguide detector based on Schottky diode is presented. It utilizes an E-plane probe as a transition from waveguide to micro-strip line, and couples the signal to the diode by impedance matching. The measurement results show that: with a -30 dBm input power, the circuit can achieve a peak voltage responsivity around 8 900 V/W, and over 1 000 V/W from 75 GHz to 105 GHz.

Key words: millimeter wave; planar Schottky diode; W-band; detector; voltage responsivity

太赫兹波是指频率在 0.1 THz~10 THz, 波长为 0.03 mm 到 3 mm 范围内的电磁波^[1]。在微波、红外、可见光 等技术广泛应用的情况下,太赫兹技术发展滞后的主要原因是缺乏切实可行的信号产生方法和检测手段。太赫兹 技术的潜在应用涉及广泛,包括宽带通信、大气遥感、深空探测、医学成像、无损检测、安全检查等^[2-4]。W 波 段作为太赫兹频谱的起始波段,应用最为广泛。本文基于该需求研制了零偏置的直接检波器,具有高灵敏度、常 温使用和低成本的特点,为太赫兹雷达和成像技术提供了有效的检测手段。

肖特基二极管具有极低的寄生电容和级联电阻,可用于太赫兹频段的倍频器、混频器和检波器当中。相比于 Galey Cell 和热辐射测定器,基于肖特基二极管的直接检波技术具有低噪声、高反应率和常温使用的特点。最初 的肖特基二极管采用了须触式结构,直到 20 世纪 80 年代末期,平面结构的肖特基二极管问世,它采用了金属阳 极引线代替传统的须触连接。与须触式结构相比,平面结构的二极管接触机制形成稳定,金属阳极引线坚固,可 进行大规模重复制造^[5]。目前,基于肖特基二极管的直接检波器具有 2 种馈电模式:一种为波导馈电模式,电磁 波通过 *E* 面探针由波导传输到微带线上,然后通过阻抗匹配耦合到二极管;另一种为准光馈电模式,电磁波通 过介质透镜聚束到平面天线上并耦合到二极管。前者由于受到波导截止频率的限制,工作带宽有限,但是电路匹 配性能良好,可以获得高灵敏度;准光检波器没有频率的限制,可实现超宽带,但是插损较高,灵敏度较低。

国外太赫兹技术起步较早,肖特基二极管检波器的研制较为成熟,并已形成了相应的产品。其中,德国的

PRG 公司开发的肖特基二极管波导检波器,工作频率为 50 GHz~900 GHz,响应度为 300 V/W~4 000 V/W^[6];爱 尔兰 Farran 公司研制的检波器覆盖了 90 GHz~325 GHz 的主流频段,响应度为 1 000 V/W~2 750 V/W^[7];美国 VDI 公司分别研制了波导和准光 2 种形式的直接检波器,典型响应度在 100 GHz 可达 3 000 V/W,在 1 500 GHz 可达 3000 V/W^[8]。国内在太赫兹技术领域虽然起步较晚,但是近几年发展迅速。其中北京理工大学分别研制了 Ku,Ka,V 和 W 四个频带的准光检波器,最佳响应度可达 1 300 V/W。中国科学院微电子研究所研制了基于零偏置肖特基 二极管的 270 GHz 高性能波导检波器,检波器的最大电压响应度为 1 600 V/W,在 260 GHz~280 GHz 范围内,电压响应的典型值为 1 400 V/W^[9]。

本文基于英国 Teratech 公司提供的平面肖特基二极管进行电路设计和仿真,并由 Teratech 公司进行装配和测试。测试结果与仿真结果基本吻合,验证了设计方法的有效性。检波器在-30 dBm 输入功率下,电压反应率的峰值可达 8 900 V/W;在 75 GHz~105 GHz 的频率范围内,电压反应率在 1 000 V/W 以上。

1 肖特基二极管的特性及检波原理

肖特基二极管具有非线性的伏安特性,可用于小信号的检测。当交流小信号加载到二极管上时,它产生的直 流电压与输入信号的功率成比例关系。通过测试二极管两端的直流电压就可以探测出入射信号的功率。根据这个 特性,肖特基二极管可用于交流信号功率的直接检测。

肖特基二极管的伏安特性可以通过二极管的等效方程来表示[10]:

$$I(U) = I_{s} \left[\exp\left(\frac{qU_{j}}{\eta kT}\right) - 1 \right]$$
⁽¹⁾

式中:在室温情况下(*T*=293 K), kT/q=25.8 mV, k是玻尔兹曼常数, k=1.37×10⁻²³ J/K; I_s 是二极管的饱和电路; η 是二极管的理想因子(η >1)。二极管的电压反应率 Rv可以表示为:

$$Rv = \frac{\frac{d^2U}{dI^2}}{2\frac{dU}{dI}} = \frac{1}{2(I_d + I_s)} = \frac{1}{2I_s}$$
(2)

式中 *I*_d 为二极管的偏置电流。可见,作为零偏置二极管,它的电压反应率由饱和电流大小决定。当二极管用作 检波器时,等效噪声功率(Noise Equivalent Power, NEP)是衡量检波器灵敏度的关键参数。它定义为检波器的电 压噪声密度与电压反应率的比值,表征了检波器能检测到的最小功率密度。

$$NEP = \frac{U_{\rm nd}}{R_{\rm v}} \tag{3}$$

式中U_{nd}是电压噪声密度,它由二极管的结电阻所决定。对于零偏置的肖特基二极管,结电阻值在几千欧姆到几 万欧姆之间。

2 W 波段检波器设计及仿真

2.1 平面肖特基二极管模型及参数

二极管作为检波器的核心部件,它的性能好坏直接影响了 检波器的灵敏度。肖特基二极管根据其结构和性能的不同,分 别可以用来倍频、混频和检波。根据二极管检波特性分析,零 偏置的检波管需要具有较低的结电阻,以保证有效的信号耦合



Fig.1 Photo of the diode from Teratech 图 1 Teratech 公司肖特基检波管照片

和高截止频率。本文检波器采用了英国 Teratech 公司 SD2 系列砷化镓(GaAs)平面肖特基二极管^[11]。它具有较低的结电容和结电阻,可用于太赫兹频段的直接检波。二极管芯片结构如图 1 所示,芯片参数如表 1 所示。其芯片 厚度为 15 μm,长宽为 100 μm×50 μm,肖特基阳极区域大小为 1.54 μm²,结电容约为 2.3 fF。

2.2 电路拓扑结构

W波段检波器的整体平面拓扑结构如图 2 所示,采用了主流的上下分体式腔体结构。电路基于 GaAs 肖特基 二极管和低损耗石英基片,由 E 面探针、匹配电路、芯片开路和检波输出 4 部分组成。其中,采用了降高波导和 三角探针来提高波导-微带转换的工作带宽;芯片后端采用了开路结构对电磁波进行抑制,以增强信号与二极管

的耦合;采用了高阻抗传输线来输出检波信号,从而降低输入信号的损失。

Table1 Performance comparisons of detectors					
diode and structure		typical NEP/(pW/ \sqrt{Hz})	voltage responsivity/(kV/W)	<i>f</i> /THz	ref.
RAL ZBD	waveguide detector	5	1.0-9.0	0.075-0.110	this work
ACST ZBD	spiral detector	500	0.2	0.05-1.00	[12]
VDI ZBD	quasi-optical detector	20	0.015-0.280	0.14-0.24	[13]
	waveguide detector	2	2.5-4.0	0.11-0.17	[8]
SBD	130 nm CMOS	33	0.05-0.25	0.27-0.29	[14]
Golay Cell	—	80	100–150	THz-MIR	[15]
pyroelectric	—	400	150	0.1-30	[16]

表1 检波器性能对比

2.3 检波器的仿真

首先,采用 HFSS 软件对电路中的无源结构进行优化仿真;然后把仿真结果以 S 参数形式导入到 ADS 软件中,通过谐波平衡算法来仿真电路的非线性检波特性。整体电路的仿真模型如图 3 所示,电路基于三端口检波器模型:其中端口 1 为标准波导口;端口 2 为肖特基结端口,用于连接二极管模型;端口 3 为直流检波端口。仿真结果如图 4、图 5 所示,在 75 GHz~110 GHz 频带内,检波器电压反应率高于 4 000 V/W,峰值接近 7 000 V/W。由于二极管的阻抗值较高,一般为几千欧姆,如不采用吸波负载,很难在宽频带内实现较低的回波损耗。由于课题应用对回波不做要求,为了简化电路,并未使用额外的吸波元件。





Fig.3 Simulation model of the detector circuit 图 3 检波器仿真电路



图 5 检波器回波损耗仿真结果

3 W 波段检波器实现与测试

W 波段检波器在英国卢瑟福实验室完成安装及测试。检波器电路实物图如图 6 所示。电路基于 50 μm 厚度 的石英基片,二极管倒装焊接在石英基片上,焊接后的电路安装在背对背的波导腔体中。测试链路如图 7 所示, 信号源经过 6 倍频器产生 W 波段信号,然后通过可调制衰减器来控制输入到检波器中的信号功率,检波器测量 到的功率信号以电压的形式输入到测试仪表中。



Fig.6 Photo of the inside of the detector 图 6 检波器内部结构图



Fig.7 Photo of the measurement setup 图 7 检波器测试链路图

检波器的频谱特性如图 8 所示,当输入功率为-30 dBm 时,反应率峰值可达 8 900 V/W,75 GHz~105 GHz 的测试频带内,不低于 1 000 V/W,频谱变化趋势与仿真结果较为一致,最佳工作频率在 85 GHz 附近。图 9 描述了检波器反应率随输入功率的变化趋势:检波器反应率在输入功率为-30 dBm 时达到最大;在-50 dBm~-10 dBm 的范围内,电压反应率不低于 2 000 V/W,满足了大部分场景的测试需求。通过对检波器进行噪声测试,根据式(3)可以计算出检波器的 NEP,如图 10 所示。检波器最低等效噪声密度可达 1 pW/√Hz,在 75 GHz~105 GHz 频率范围内低于 8 pW/√Hz。基于以上的测试结果,与国际上主流的毫米波检波器进行了对比,如表 1 所示。通过对比可以看出:肖特基二极管的检波器灵敏度普遍高于 Galey Cell 和热辐射测定器;本课题研制的波导检波器性能高于主流的准光检波器和 CMOS 检波器;与基于 VDI 芯片研制的检波器性能接近,达到世界的先进水平。



4 结论

本文介绍了 W 波段直接检波器的设计、仿真、装配和测试。首先,对平面肖特基二极管的检波性能进行了分析;然后基于二极管特性进行电路设计,使电磁波从波导基模耦合到二极管上;接下来通过 ADS 和 HFSS 软件对检波器的性能进行了仿真;最后对装配好的检波器进行测试。测试结果表明:在-30 dBm 输入功率下,电压反应率的峰值可达 8 900 V/W;在 75 GHz~105 GHz 的频率范围内,电压反应率在 1 000 V/W 以上,NEP 低于 8 pW/√Hz,达到了世界先进水平。在接下来的研究工作中,将完善二极管检波器模型,提高制造工艺及测试手段,实现自主研发。

参考文献:

- [1] SIEGEL P H. Terahertz technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2002,50(3):910-928.
- [2] SIEGEL P H, DENGLER R J. Terahertz heterodyne imaging part I:introduction and techniques[J]. International Journal of Infrared & Millimeter Waves, 2006,27(4):465-480.
- [3] SIEGEL P H,DENGLER R J. Terahertz heterodyne imaging part II:instrumets[J]. International Journal of Infrared & Millimeter Waves, 2006,27(5):631-655.
- [4] LEISAWITZ D, DANCHI W C, DIPIRRO M J, et al. Scientific motivation and technology requirements for the SPIRIT and SPECS far-infrared/submillimeter space interferometers[J]. Proc. SPIE, 2000:36–46.
- [5] ALDERMAN B, SANGHERA H, PRICE C, et al. Fabrication of reproducible air-bridged Schottky diodes for use at frequencies near 200 GHz[C]// International Conference on Infrared and Millimeter Waves. 2007:848-849.
- [6] Detector series from RPG[EB/OL]. [2015-12-22]. http://www.radiometer-physics.de/rpg/html/Products_Components _ZBD.html.
- [7] CD detector series from Farran technology[EB/OL]. [2015-12-22]. http://www.Farran.com.
- [8] HESLER J L,CROWE T W. NEP and responsivity of THz zero-bias Schottky diode detectors[C]// Proc. Joint 32nd Int. Conf. Infrared Millimeter Waves and 15th Int. Conf. Terahertz Electronics. Cardiff,Britain:[s.n.], 2007:844-845.
- [9] 张建军,周静涛,杨成樾,等. 基于零偏置肖特基二极管的 270 GHz 高性能波导检波器[J]. 红外毫米波学报, 2015,34(1):
 1-5. (ZHANG Jianjun,ZHOU Jingtao,YANG Chengyue, et al. A 270 GHz high performance waveguide detector utilizing a zero bias Schottky diode[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2015,34(1):1-5.)
- [10] COWLEY A M,SORENSEN H O. Quantitative comparison of solid-state microwave detectors[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 1966,14(12):588-602.
- [11] Schottky diode from Teratech components company[EB/OL]. [2015-12-22]. http://www.teratechcomponents.com/.
- [12] SEMENOV A,COJOCARI O,HUBERS H W,et al. Application of zero-bias quasi-optical Schottky-diode detectors for monitoring short-pulse and weak terahertz radiation[J]. IEEE Electron Device Letters, 2010,31(7):674-676.
- [13] LIU L,XU H,DUAN Y,et al. A 200 GHz Schottky diode quasi-optical detector based on folded dipole antenna[C]// 20th International Symposium on Space Terahertz Technology. Charlottesville,USA:[s.n.], 2009.
- [14] HAN R,ZHANG Y,COQUILLAT D,et al. A 280 GHz Schottky diode detector in 130 nm digital CMOS[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2011,46(11):1-4.
- [15] Goley cell. Tydex[EB/OL]. [2015-12-22]. http://www.tydex.ru/products/thz_optics/golay_cell/.
- [16] Pyroelectric Detector. Product Sheet for Model SPH-62. Spectrum Detector Inc. [EB/OL]. [2015-12-22]. http://www.spectrumdetector.com.

作者简介:



刘海瑞(1983-),男,吉林省梅河口市人,博士,主要研究方向为毫米波准光技术、毫米 波混频及倍频组件.email:liuhairui1983@126.com.

Colin Viegas, 男, 英国曼切斯特大学在读博士研究生, 主要研究方向为毫米波组件及系统测试. Jeff Powell, 男, 博士, 英国 Teratech 公司设计 总师, 主要研究方向为微波、毫米波电路设计.

Byron Alderman, 男, 博士, 卢瑟福阿普尔顿 实验室毫米波技术组首席工程师, Teratech 公司首 席执行官,主要研究方向为肖特基芯片的生长工艺 及装配.

俞俊生(1961-),男,安徽省无为县人,博士, 教授,博士生导师,主要研究领域为物理电子学、 等离子体电子学等.