

基于肖特基势垒二极管的太赫兹 固态倍频源和检测器研制

姚常飞^{1,2}, 周 明², 罗运生², 许从海², 寇亚男², 陈以钢²

(1. 南京电子器件研究所微波毫米波单片集成和模块电路重点实验室, 江苏南京 210016;

2. 南京电子器件研究所微波毫米波模块电路事业部, 江苏南京 210016)

摘 要: 本文基于 GaAs 肖特基势垒二极管以及混合集成电路工艺, 对太赫兹固态倍频和检测技术开展了研究. 文章结合肖特基势垒二极管物理结构, 采用电磁场仿真软件和电路仿真软件相结合的综合分析方法, 对各模块电路进行优化设计, 研制出了高倍频效率的倍频源和高灵敏度的检测器(检波器和谐波混频器). 0.15THz 检波器测得最高检波电压灵敏度 1600mV/mW, 在 0.11 ~ 0.17THz 灵敏度典型值为 600mV/mW, 切线灵敏度优于 -29dBm. 0.15THz 二倍频器测得最高倍频效率 7.5%, 在 0.1474 ~ 0.152THz 效率典型值为 6.0%. 0.18THz 二倍频器测得最高倍频效率 14.8%, 在 0.15 ~ 0.2THz 效率典型值为 8.0%. 0.15THz 谐波混频器测得最低变频损耗 10.7dB, 在 0.135 ~ 0.165THz 变频损耗典型值为 12.5dB. 0.18THz 谐波混频器测得最低变频损耗 5.8dB, 在 0.165 ~ 0.2THz 变频损耗典型值为 13.5dB, 在 0.21 ~ 0.24THz 变频损耗典型值为 11.5dB.

关键词: 太赫兹; 倍频器; 检波器; 谐波混频器

中图分类号: TN77 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013)03-0438-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.03.004

Development of Terahertz Frequency Solid State Multiply Sources and Sensors with Schottky Barrier Diodes

YAO Chang-fei^{1,2}, ZHOU Ming², LUO Yun-sheng², XU Cong-hai², KOU Ya-nan², CHEN Yi-gang²

(1. *Science and Technology on Monolithic Integrated Circuits and Modules Laboratory, Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing, Jiangsu 210016, China;*

2. *Department of Microwave and Millimeter Wave Modules, Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing, Jiangsu 210016, China*)

Abstract: Terahertz solid state frequency multiplying sources and sensors are developed with GaAs Schottky barrier diodes and hybrid integrated circuit process. Based on physical structure of diode, high efficiency multipliers, and high sensitivity sensors, such as detectors and subharmonic mixers (SHM) are developed with the combination of electromagnetic (EM) full-wave tool and circuit simulation tool. To the 0.15THz detector, highest measured voltage sensitivity is 1600mV/mW, typical sensitivity is 600mV/mW in 0.11 ~ 0.17THz, and tangential signal sensitivity (TSS) is superior than -29dBm. To the 0.15THz frequency doubler, highest measured multiply efficiency is 7.5%, and typical efficiency is 6.0% in 0.1474 ~ 0.152THz. To the 0.18THz frequency doubler, highest measured multiply efficiency is 14.8%, and typical efficiency is 8.0% in 0.15 ~ 0.2THz. To the 0.15THz SHM, lowest measured conversion loss is 10.7dB, and typical conversion loss is 12.5dB in 0.135 ~ 0.165THz. To the 0.18THz SHM, lowest measured conversion loss is 5.8dB, and typical conversion loss is 13.5dB and 11.5dB in 0.165 ~ 0.2THz and 0.21 ~ 0.24THz, respectively.

Key words: terahertz; multiplier; detector; subharmonic mixer (SHM)

1 引言

太赫兹(THz)波介于毫米波与红外光之间相当宽范围的电磁辐射区域,太赫兹技术已广泛应用于深空探测、遥感技术、射电天文学等领域.早在上世纪70年代,

国外就对太赫兹固态电路技术开展了研究,近年来,各类太赫兹波应用系统需求日益增长,以及 GaAs 半导体二极管工艺飞速发展,国外在结构紧凑、高可靠性、宽带太赫兹波固态倍频器、混频器和检波器等方面开展了研究,目前已有商用的工作到 3THz 的倍频源模块和工作

到 1.7THz 的混频器,基于元部件方面所取得的技术进步,目前已出现工作到 0.65THz 的商用收发系统,国外太赫兹技术已经被广泛应用于各个领域,在射电天文领域,太赫兹望远镜的大量科学产出以及 ALMA(频率 30~1000GHz)的建设,标志着太赫兹射电天文观测技术已发展到了一个新的水平.同时,美国等西方国家陆续发射了各类太赫兹小型探测器,最引人关注的是 NASA 的小型探测器计划(SMEX),主要由 13 颗卫星构成,装备了各类太赫兹 T/R 组件^[1~6].我国太赫兹固态技术研究还处于起步阶段,技术较为薄弱,离系统化应用还有很大的差距^[7],这与国内对太赫兹系统的发展需求和太赫兹技术的广阔应用前景不相适应,再者国外在太赫兹技术和元器件等领域对我国实施严格的封锁与禁运,因此立足国内技术积累和元器件基础深入开展太赫兹固态技术领域的研究是非常必要的.

目前,国际上太赫兹固体功率放大器和低噪声放大器研究尚未成熟,离实用化还有很大差距,所以倍频器成为获得太赫兹固态辐射源的主要方式^[3~6,8~16],而混频器是构成太赫兹接收链路的第一级电路(接收机灵敏度主要由混频器决定)^[3~6,17~19],因此高倍频效率、低变频损耗的太赫兹固态倍频器、混频器是研究太赫兹收发组件的关键所在.本文开展了太赫兹固态电路非线性器件模型参数提取、嵌入阻抗计算、模块电路优化设计等研究工作,采用场与路相结合的系统综合分析方法,分析研究太赫兹倍频源和检测器,实现太赫兹高输出功率倍频源、高灵敏度检波器、低变频损耗混频器,为开发太赫兹模块电路和系统奠定重要的理论基础与技术积累.

2 电路设计

太赫兹检波器、混频器和倍频器模块电路的基本设计流程图如图 1,首先必需确定各模块电路的实现结构,本文设计的混频器和倍频器都选用了平衡式的结构,平衡式的电路结构不但简化了电路设计,提高模块电路性能,还节省了仿真计算时间,提高了设计效率.其次根据相应的电路结构,及二极管所处的边界条件,建立所采用的二极管在电磁场仿真软件 HFSS 中的物理结构模型,根据场软件提取出的 S 参数文件,在电路仿真软件 ADS 中采用谐波平衡分析法确定模块电路各个频率点的最优输入和输出阻抗,再次据最优阻抗分别单独优化设计电路的各个无源部分,如输入和输出波导-微带过渡、匹配网络等无源电路.最后基于优化设计得到的无源网络电路结构,建立模块电路的整体场仿真模型,并提取相应的多端口 S 参数文件,在电路仿真软件中模拟模块电路的性能并优化偏置工作点,性能满足设计要求则电路参数输出,不满足指标要求,

则重新优化设计电路的各个无源网络.

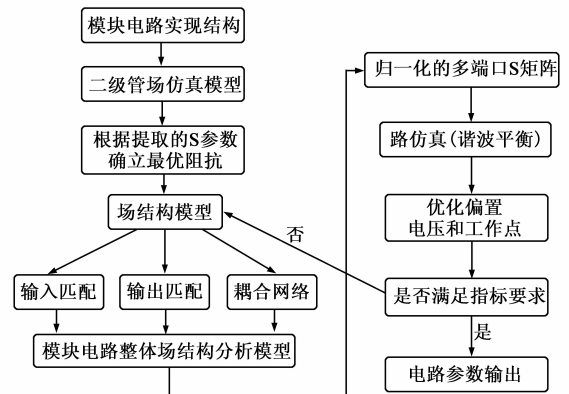


图1 模块电路设计流程

2.1 二极管嵌入阻抗

在太赫兹频段,由于频率极高,设计模块电路时必须考虑非线性二极管无源部分各种寄生参数的影响,同时还要兼顾电路后期微组装和金加工等产生的影响,二极管各种寄生电感、电容如图 2 所示.采用场分析的方法可以有效的把各种寄生参数考虑在内,在数值仿真计算时,对二极管的制作材料参数做了些仿真近似如表 1 所列,重掺杂的 n^{++} 被模拟成理想导体,其它所有材料都被模拟成无损耗的介质,以便缩短仿真时间.考虑到激励端口直接加载到二极管焊盘位置会影响场仿真计算精度,通过在二极管的两端焊盘部分,分别引入一段传输线,通过去嵌入阻抗计算方法,计算得到更为精确的二极管 S 参数,本文以检波器的检波二极管嵌入阻抗计算为例加以说明,如图 3 所示,二极管的非线性肖特基结被设置成 Lumped 端口.基于场仿真提取的二极管 S 参数,在路仿真软件中,根据技术指标设计目标,采用谐波平衡分析方法,优化设计得到各模块电路的最优端口阻抗.

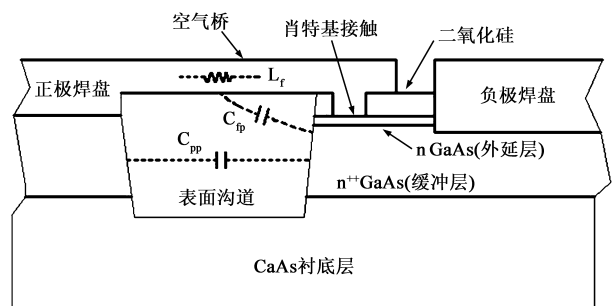


图2 二极管物理结构及寄生参数

表 1 二极管材料参数设置

N^{++} 型 GaAs 外延层	理想导体
N 型 GaAs 缓冲层($\epsilon_r = 12.9$)	无损耗介质
GaAs 衬底层($\epsilon_r = 12.9$)	
SiO_2 层($\epsilon_r = 4$)	

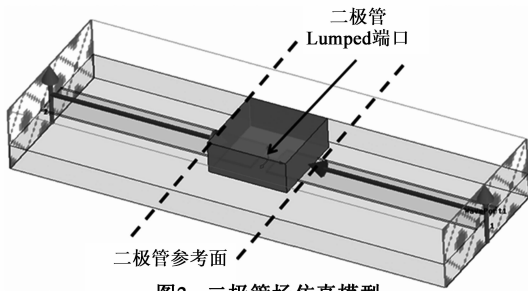


图3 二极管仿真模型

2.2 波导-微带过渡

为实现波导阻抗到微带线阻抗的匹配,需要设计实现波导-微带过渡的匹配网络,实现电磁波信号能量的最大传输.设计的波导-微带过渡结构如图4,为实现宽频带特性,对标准波导作了减高处理,以实现更宽的频带,信号通过探针过渡

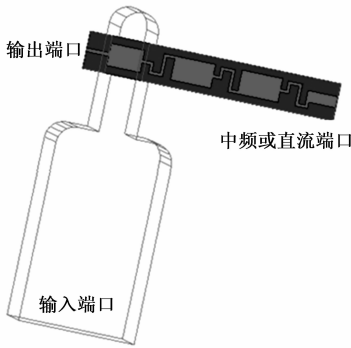


图4 波导-微带过渡

实现到输出端口的耦合,传输输出至二极管,对于另一输出中频或直流地端口采用折叠微带线结构,以减小电路尺寸,实现对输入信号的隔离.对于该端口,如果是检波器,则被设计成直流地端口;如果是倍频器则被设计成偏置端口;如果是谐波混频器,则被设计成中频地或者中频输出端口,同时射频信号在此端口能实现很大的隔离^[20].

2.3 电路优化设计

太赫兹检波器、混频器和倍频器模块电路主要由以下几部分组成:输入输出波导-微带过渡、输入输出匹配网络及中频(或馈电)低通

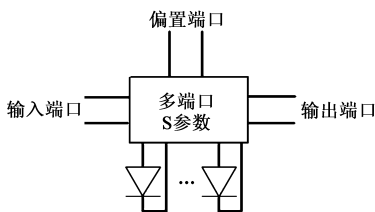


图5 模块电路一体化仿真模型

滤波网络.输入输出波导-微带过渡的采用如图4所示的结构实现.输入输出匹配网络基于2.1节计算得到的二极管嵌入阻抗,采用线性分析方法优化设计实现.中频(或馈电)低通滤波网络采用折叠微带线实现,以缩小电路尺寸.各部分经过单独优化设计后,结合二极管物理结构,在场仿真软件中建立模块电路的整体仿真模型,通过提取相应的多端口S参数文件,基于二极管非线性理想模型,如图5所示,在ADS中优化仿真偏置工作点和性能指标,如果性能满足要求,设计输出,不满足指标要求,则重新优化设计电路的各个无源网络.

3 试验研究

太赫兹检波器、混频器和倍频器电路传输线基板均采用低损耗角的熔制石英,介电参数3.78,厚度 $80\mu\text{m}$,采用薄膜工艺制作微带金属线条,工艺流程如图6所示.划完片后的电路板采用Epoxy公司的H20E导电银胶固定到壳体上,二极管同样采用该导电银胶焊接到电路板相应位置处.电路壳体分上下腔加工,采用铜镀金材料.检波器、混频器和倍频器模块电路实物照片、测试系统框图、测试性能曲线及性能比较如图7~16、表2~4所示.比较看出,检波器性能达到了国外同类产品的性能水平.倍频器和国外VDI公司(目前该公司代表了国外太赫兹模块及应用系统的最高水平)的倍频器效率相比,效率典型值要低1.5个百分点,但最高倍频效率要高,通过后期研究工作的进一步展开,倍频效率典型值完全可以赶超国外水平.和国外Farran公司、VDI公司和VivaTech公司相比,谐波混频器变频损耗恶化约4dB,该技术指标在以后的工作中将作进一步的优化改进.

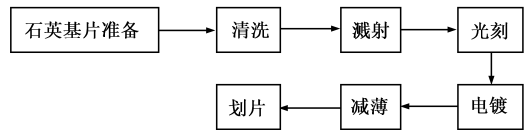


图6 石英电路设计工艺流程

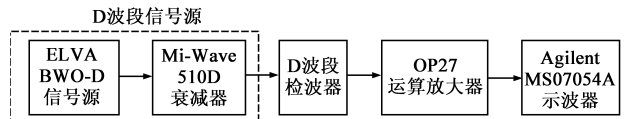


图7 0.15THz检波器测试系统

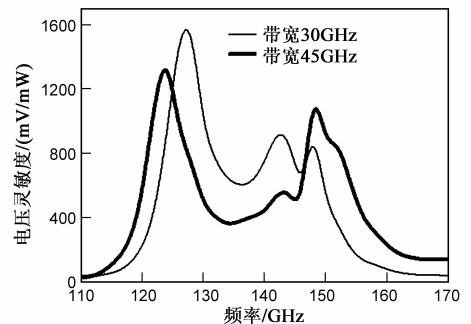


图8 0.15THz检波器测试曲线

表2 检波器性能比较

公司	型号(D波段)	电压灵敏度(mV/mW)
本文	—	典型值 600, 最大值 1600
ELVA-1	ZBD-06	典型值 500, 最小值 200
Farran	WDP-06	大于 220, 最大值 400
Millitech	DXP-06	大于 150, 最大值 600

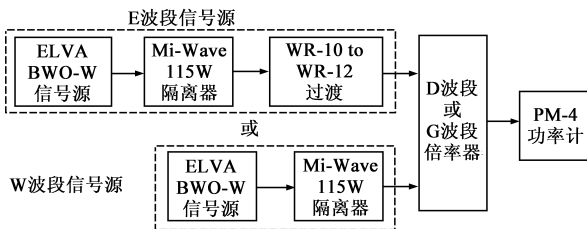


图9 0.15THz和0.18THz二倍频器测试系统

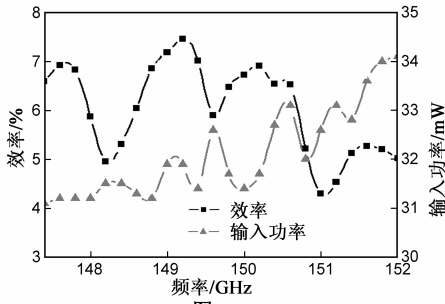


图10

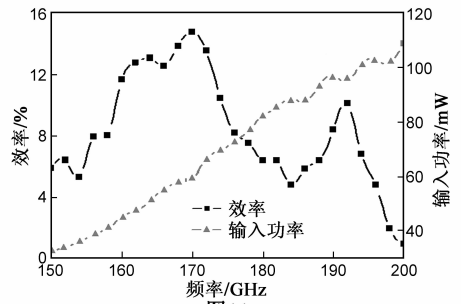


图11

表 3 二倍频器性能比较

公司	型号(D波段)	倍频效率	型号(G波段)	倍频效率
本文	--	典型值 6%	--	典型值 8% 最大值 14.8%
VDI	WR6.5 × 2	典型值 7.5%	WR5.1 × 2	典型值 9.5% 最大值 13%

设计的模块部分性能指标达到或者优于国外的性能,这是太赫兹固态技术国产化的一次大胆尝试.在后期工作中,我们将结合模块电路设计,二极管寄生参数,

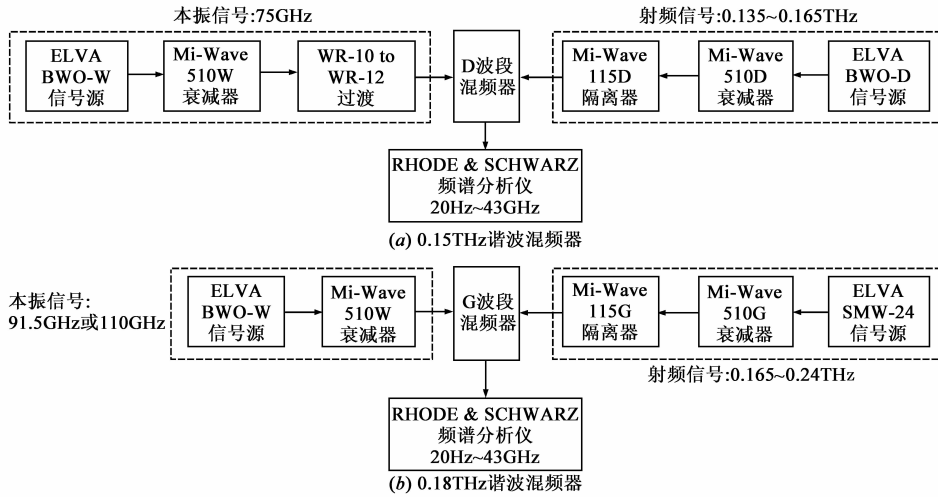


图12 谐波混频器测试系统框图

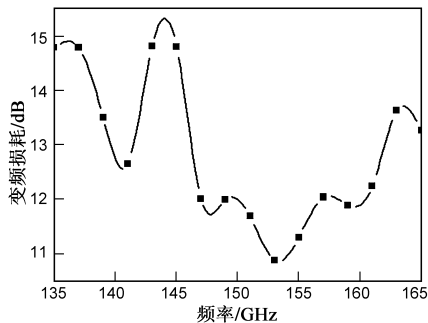


图13 0.15THz谐波混频器测试曲线 (本振频率75GHz)

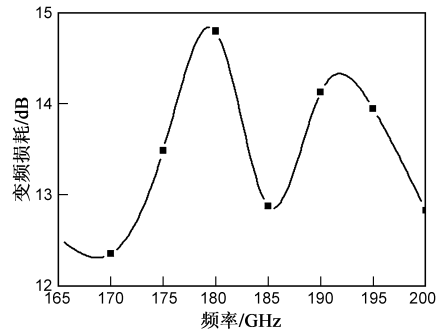


图14 0.18THz谐波混频器测试曲线 (本振频率91.5GHz)

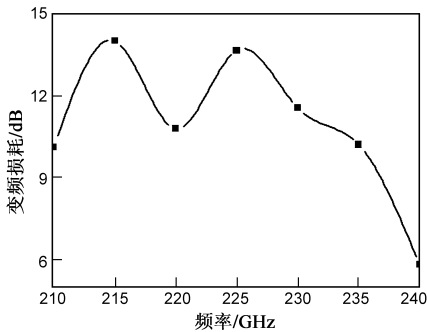


图15 0.18THz谐波混频器测试曲线(本振频率110GHz)

包括二极管制作材料(缓冲层、外延层材料掺杂浓度)、物理结构(缓冲层和外延层厚度、空气桥尺寸、倒装焊盘大小等)、热分析研究(功率密度、热容力、热传导



图16 检波器、倍频器及谐波混频器实物照片

4 结论

本文采用混合集成技术,立足现有的技术条件、工艺水平、金加工等,基于 GaAs 肖特基势垒二极管,对太赫兹固态倍频和检测技术开展了研究.为实现模块电路的高性能,结合二极管物理结构,采用场和路相结合的系统分析方法,基于一体化的设计理念,优化设计各模块电路的匹配网络,研制出了高倍频效率的倍频器、高灵敏度的检波器和低变频损耗的谐波混频器.0.15THz 检波器测得最高检波电压灵敏度为 1600mV/mW;在 0.11~0.17THz 灵敏度典型值为 600mV/mW,切线灵敏度优于 -29dBm.0.15THz 二倍频器在 0.1492THz 测得最高倍频效率为 7.5%;在 0.1474~0.152THz 效率典型值为 6.0%.0.18THz 二倍频器在 0.17THz 测得最高倍频效率为 14.8%;在 0.15~0.2THz 效率典型值为 8.0%.0.15THz 谐波混频器在 0.153THz 测得最低变频损耗为 10.7dB;在 0.135~0.165THz 变频损耗典型值为 12.5dB.0.18THz 谐波混频器在 0.24THz 测得最低变频损耗为 5.8dB;在 0.165~0.2THz 变频损耗典型值为 13.5dB;在 0.21~0.24THz 变频损耗典型值为 11.5dB.这些研究工作解决了相应频段辐射计系统的核心模块电路,为后期开展太赫兹收发系统研究打下了基础.

太赫兹倍频源和检测器的某些技术指标达到了国际先进水平,但还有很多不足和需要进一步展开的工

等),综合优化设计电路和非线性器件,设计出满足应用要求的太赫兹肖特基二极管及更高频段的模块电路.

表 4 谐波混频器性能比较

公司	型号 (D 波段)	变频损耗 (dB)	型号 (G 波段)	变频损耗 (dB)	测试 说明
本文	0.135~ 0.165THz	典型值 12.5	0.165~ 0.2THz	典型值 13.5	单边带
	0.147~ 0.153THz	小于 12	0.21~ 0.24THz	典型值 11.5	
Farran	SPM-06	典型值 8.5	SPM-05	典型值 4.4	双边带
VivaTech	VTSHM-06A	典型值 6	VTSHM-04A	典型值 6	双边带
VDI	WR6.5SHM	小于 7.0	WR5.1SHM	小于 7.0	双边带

作,如可靠性、高低温性能等.需要结合模块电路结构设计、热分析设计、力学设计等作进一步的研究和探索,争取设计出满足实际工程应用的太赫兹模块电路和系统.这些研究工作也为后期探索 0.36THz、0.4THz 及更高频段的太赫兹电路和系统奠定了重要的理论与技术基础.

参考文献

- [1] Ward J, Maiwald F, Chattopadhyay G, et al. 1400-1900GHz local oscillators for the herschel space observatory [A]. Proceedings Fourteenth International Symposium on Space Terahertz Technology[C]. Tucson, USA: IEEE, 2003. 94-101.
- [2] Maestrini A, Ward J S, Chattopadhyay G, et al. THz sources based on frequency multiplication and their applications [J]. Journal of RF-Engineering and Telecommunications, 2008, 5 (6): 118-122.
- [3] [DB/OL]. <http://www.virginiadiodes.com>, 2012.
- [4] [DB/OL]. <http://www.mmt.rl.ac.uk>, 2012.
- [5] [DB/OL]. <http://www.radiometer-physics.de>, 2012.
- [6] [DB/OL]. <http://www.farran.com>, 2012.
- [7] 曹康白, 王子宇. 140GHz GaAs 体效应谐波振荡器 [J]. 电子学报, 1990, 18(4): 107-108.
Cao Kang-bai, Wang Zhi-yu. 140GHz GaAs Gunn harmonic oscillators [J]. Chinese Journal of Electronics, 1990, 18(4): 107-108. (in Chinese)

- [8] Jones J R, Bishop W L, Jones S H, et al. Planar multibarrier 80/240GHz heterostructure barrier varactor triplers [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques, 1997, 45(4): 512 – 517.
- [9] Tuovinen J, Erickson N R. Analysis of a 170GHz frequency doubler with an array of planar diodes [J]. IEEE Transaction on Microwave Theory Techniques, 1995, 43(4): 962 – 968.
- [10] Porterfield D W, Crowe T W, Bradley R, 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.
- [11] Xiao Q, Hesler J L, Crowe T W, et al. A 270GHz tuner-less heterostructure barrier varactor frequency tripler [J]. IEEE Transactions on Microwave Wireless Components Letters, 2007, 17(4): 241 – 243.
- [12] Xiao Q, Duan Y W, Hesler J L, et al. A 5mW and 5% efficiency 210GHz InP-based heterostructure barrier varactor quintupler [J]. IEEE Transactions on Microwave Wireless Components Letters, 2004, 14(4): 159 – 161.
- [13] Maestrini A, Ward J, Gill J, Javadi H, et al. A 1.7 to 1.9THz local oscillator source [J]. IEEE Transactions on Microwave Wireless Components Letters, 2004, 14(6): 253 – 255.
- [14] Maestrini A, Ward J S, Gill J J, et al. A 540-640GHz high-efficiency four-anode frequency tripler [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(9): 2835 – 2843.
- [15] Maestrini A, Ward J S, Javadi H, et al. Local oscillator chain for 1.55 to 1.75 THz with 100uW peak power [J]. IEEE Transactions on Microwave Wireless Components Letters, 2005, 15(12): 871 – 873.
- [16] Maestrini A, Ward J S, Charlotte T C, et al. In-phase power-combined frequency triplers at 300 GHz [J]. IEEE Transactions on Microwave Wireless Components Letters, 2008, 18(3): 218 – 220.
- [17] Kawasaki R, Akaike M. A broad-band second-harmonic mixer covering 76-106GHz [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1978, 26(6): 425 – 427.
- [18] Raisanen A V. Subharmonic mixer with planar schottky diodes in a novel Split-block at 200-240GHz [A]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest [C]. San Diego, USA: IEEE, 1994. 775 – 777.
- [19] Thomas B, Mastrini A, Beaudin G. Design of a broadband sub-harmonic mixer using planar Schottky diodes at 330GHz [A]. Joint 29th International Conference on Infrared and Millimeter Wave and 12th International Conference on Terahertz Electronics [C]. Karlsruhe, German: IEEE, 2004. 457 – 458.
- [20] Risacher C, Vassilev V, Pavolotsky A, et al. Waveguide-to-microstrip transition with integrated bias-T [J]. IEEE Transactions on Microwave Wireless Components Letters, 2003, 13(7): 419 – 425.

作者简介



姚常飞 男, 1982 年生于江苏常州, 博士, 工程师, 现就职于南京电子器件研究所, 在国内外期刊发表科研论文十余篇. 研究方向为毫米波亚毫米波电路与系统.

E-mail: yaocf1982@163.com

周明 男, 1974 年生于江苏南京, 高级工程师, 现就职于南京电子器件研究所, 研究方向为微波毫米波电路与系统.

罗运生 男, 1944 年生于辽宁沈阳, 研究员, 现就职于南京电子器件研究所, 研究方向为微波毫米波电路与系统.

许从海 男, 1981 年生于江苏淮安, 工程师, 现就职于南京电子器件研究所, 研究方向为微波毫米波多功能组件.

寇亚男 女, 1965 年生于江苏南京, 高级工程师, 现就职于南京电子器件研究所, 获中国电科科学技术二等奖 2 项、三等奖 2 项、国防科学技术三等奖 1 项, 研究方向为微波毫米波电路多芯片微组装机工艺.

陈以钢 男, 1959 年生于江苏盐城, 高级工程师, 现就职于南京电子器件研究所, 获原电子部科技进步一等奖、二等奖、三等奖各一项. 研究方向为微波材料和器件.