

· 物理电子学 ·

基于二极管三维模型的太赫兹倍频器研究

李 理, 张 勇, 赵 伟, 钟 伟, 刘 双, 卢秋全, 徐锐敏

(电子科技大学极高频复杂系统国防重点学科实验室 成都 611731)

【摘要】基于变容二极管设计了215 GHz三倍频器。为了简化结构和提高功率容量,该倍频器采用同向并联二极管对结构实现非平衡式三倍频。由于在太赫兹频段二极管的封装会影响到器件的场分布,将传统的二极管SPICE参数直接应用于太赫兹频段的电路设计仿真存在一定缺陷。故建立了精确的二极管三维电磁模型,在非线性区域合理的设置了波端口,采用改进型场路结合仿真的方式对倍频器进行了设计。测试结果表明,该倍频器在207~226 GHz输出频率范围内,输出功率大于2 mW,最大输出功率为5.4 mW,最小变频损耗为13.1 dB。

关键词 谐波平衡法; 非平衡式倍频; 太赫兹; 三倍频器; 变容二极管

中图分类号 O44

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2015.03.009

Research of THz Frequency Tripler Based on 3D-EM Model of Varactor Diodes

LI Li, ZHANG Yong, ZHAO Wei, ZHONG Wei, LIU Shuang, LU Qiu-quan, and XU Rui-min

(EHF Key Laboratory of Fundamental Science, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

Abstract A 215GHz tripler using varactor diodes was designed. To simplify structure and enhance power capacity, a parallel diode pair was applied to realize imbalanced multiplier structure. The field distribution in circuit is seriously affected by the package of diodes at terahertz band, so the traditional method of applying SPICE parameters to design and simulate circuit is defective. The three-dimensional (3D) electromagnetic (EM) model was built precisely, and wave ports were set at the Schottky contact areas appropriately. The overall simulation of the tripler was realized in improved field-circuit combination way. The results show that in the range of 207 GHz to 226 GHz the maximum output power is 5.4mW, the minimum conversion loss is 13.1dB, and the output power is larger than 2mW.

Key words harmonic balance analysis; imbalanced multiplier structure; terahertz; tripler; varactor diode

太赫兹频率源是太赫兹波应用的重要组成部分,其技术指标很大程度上决定了太赫兹系统的性能。采用毫米波固态电路倍频到太赫兹是实现太赫兹源(特别是对于0.1~1 THz的源)一种重要和有效的方法,相对于毫米波振荡器和量子级联激光器等半导体源,倍频方式实现太赫兹源又具有频谱质量高、易于进行信号调制、结构相对简单等特点。因此,太赫兹倍频源是国内外学者采用的一种常用途径。

早期国外学者主要采用肖特基势垒二极管(阻性或容性)来实现215 GHz左右的倍频器,包括触须接触型和平面型二极管^[1-4]。近几年采用HBV(heterostructure barrier varactor)来设计的太赫兹三倍频器也越来越常见。HBV的优势在于该结构本身只

会产生奇次谐波,所以无需设计二次谐波闲置电路,整体结构较为简单^[5-7]。HBT(heterojunction bipolar transistors)和HEMT(high-electron mobility transistors)技术的逐步发展,截止频率能够达到几百兆赫兹,用单片集成电路实现太赫兹有源倍频器已经成为现实^[8-10],但是频率和输出功率都不高,且实现的技术难度极大。

国内的太赫兹固态倍频器还处于初期阶段,以混合集成电路实现为主。根据文献[11-16],在140 GHz附近可得到10 mW的输出功率(二倍频),而在220 GHz附近的倍频器输出功率为0~3 mW。

本文在研究220 GHz阻性二极管平衡式三倍频器^[17]的基础上,研制了一种变容二极管的太赫兹固态

收稿日期: 2014-03-25; 修回日期: 2014-09-02

基金项目: 国家高技术研究发展计划(ZYGX2011X002); 中央高校基本科研业务费专项资金(ZYGX2011J018)

作者简介: 李理(1984-),男,博士,主要从事毫米波及太赫兹倍频器、混频器等方面的研究。

三倍频器，在输出功率和效率方面都有显著的提升。

1 非平衡式电抗倍频器原理简述

1.1 非线性电抗倍频器简介

电抗和电阻倍频器均是常见的倍频器类型，它们取决于插入电路的无缘半导体器件的非线性电阻或者电抗特性。一般来说，电阻倍频器Q值和效率较低，频带宽；电抗倍频器Q值和效率较高，频带窄。根据Manley-Rowe公式，可知理论上电抗倍频器的效率可达到100%，实际上由于各种因素造成的损耗远达不到。

本文采用的非线性器件是肖特基变容二极管。肖特基变容二极管是从扩散电容限制中摆脱出来的多数载流子器件。它们在窄带低噪声倍频器中，工作频率可到到兆赫兹(10^{12} Hz)量级，功率最高可达100 mW。(所引证频率和功率不是同时获得的。)

1.2 非平衡式倍频的工作原理

本文的三倍频器采用了非平衡式的结构，其电路原理如图1所示。电路中两只同样的二极管芯片相对于输入和输出信号都同向并联，每个芯片含有两个管芯。流经每个二极管的电流分别为：

$$i_1 = i_2 = -i_s(e^{-\alpha V} - 1) \quad (1)$$

式中， i_s 为反向饱和电流； $\alpha=1/(\eta V_T)$ ， η 是二极管的效率常数， $V=V_s \cos(\omega_s t)$ ， $V_T=T/16\ 000$ 是温度等值电压。反向并联二极管输出的总电流为：

$$i_1 = i_1 + i_2 \quad (2)$$

输出电流含有基波和所有奇偶谐波，这种二极管对同向并联的结构没有抑制谐波，故对三倍频器来说需要另外的电路结构来抑制谐波，尤其是二次谐波。

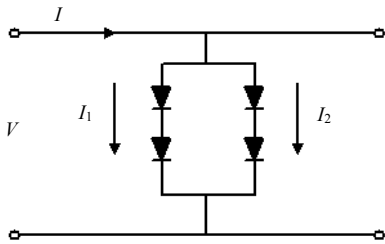


图1 非平衡式倍频电路原理图

选择非平衡结构的原因在于，如果采用平衡结构，馈电端与主电路相连接处必须为二极管处，则较难避免在非线效应最强的位置引入不连续性或者信号泄漏。具体对本结构来说不连续性或信号泄漏是由腔体壁上的开口以及直流偏置低通滤波器带来的。经过多次试验，无论是采用多级低通滤波器或是在四分之一波长处放置旁路电容，效果均不特

别理想。最终选择采用本文的非平衡式结构，避免在二级管处馈电，并且使得直流偏置低通滤波器的设计简单。另外，根据文献[18]，该结构有更好的热量散发通道。

2 倍频器的结构和设计

2.1 倍频器的整体结构

倍频器电路结构如图2所示。输入信号频率范围为68~77 GHz，经由右端E面波导-微带探针转化为准TEM模式，再由基波低通滤波器以及输入匹配结构传输至同向并联的二极管对，由变容二极管的非线性效应会产生各阶谐波信号，并经过输出匹配结构和输出E面探针转化为波导模式，由标准波导WR4输出。

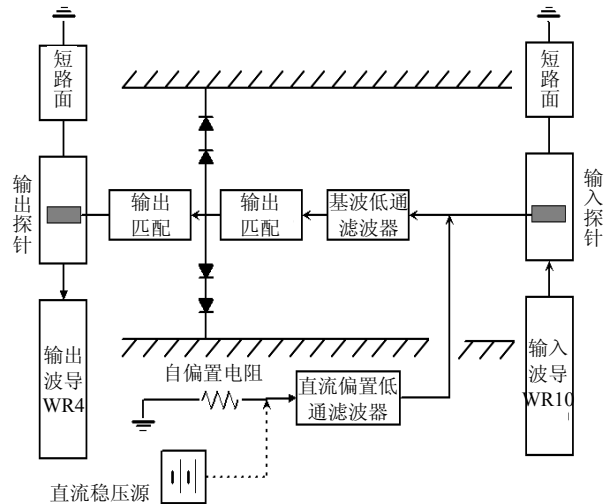


图2 电路整体结构框图

2.2 二极管三维建模及参数设置

在微波毫米波频段，因为一般情况下波长远大于器件尺寸，二极管封装产生的寄生参量较小，忽略这些寄生参量也能达到设计要求。然而，当频率上升到太赫兹段，寄生效应将变得越来越严重，以至于会影响器件的工作性能。为了更加精确地设计倍频器，提高倍频效率，本文对二极管进行了较为准确的三维建模。

选用Teratech AS2/4G2作为非线性器件，它是一种金属-半导体接触势垒二极管，整个芯片为反向串联的4个管芯。该芯片的外部尺寸为 $361\ \mu\text{m} \times 72\ \mu\text{m} \times 62\ \mu\text{m}$ 。每个管芯的阳极横截面积为 $9.1\ \mu\text{m}^2$ ，计算得到的零偏结电容为13.6 fF，串联电阻为2.2 Ω ，截止频率约为5.6 THz，理想因子N为1.2，反向击穿电压大于3 V。变容二极管在三维场仿真软件HFSS(high frequency structure simulator)中的模型如图3所示，各层参数设置见表1。

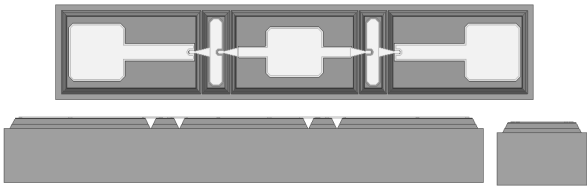


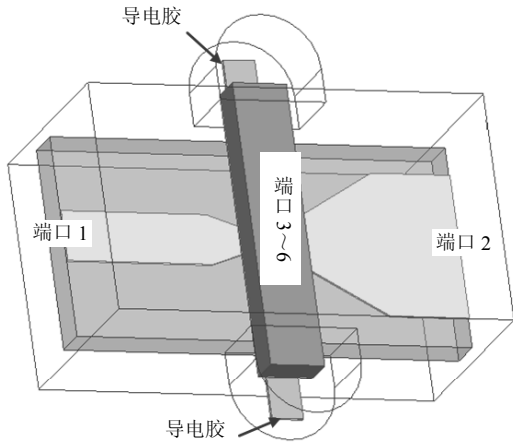
图3 二极管三维模型三视图

表1 二极管三维模型各层设置

层	介电常数	厚度/ μm	电导率/ $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$
基片(GaAs)	12.9	55	0
缓冲层(N^+)	1	5	1×10^{30}
外延层(N)	12.9	0.26	0
保护层(SiO_2)	4	0.5	0
焊盘(gold)	1	1.76	4.1×10^7

2.3 改进型的场路结合整体仿真

传统的场路结合仿真做法如文献[3], 通过在ADS中建立集总参数为表征的等效电路来拟合二极



管在片测试得到的S参数曲线, 以此进行整体仿真。该方法需要提取的主要参数有: C_{fp} 为金属阳极和欧姆接触焊盘间的寄生电容; C_{pp} 为欧姆接触焊盘相互间的寄生电容; C_p 为欧姆接触焊盘与地或者高掺杂层之间产生的寄生电容; L_f 、 R_f 分别为金属阳极的寄生引线电感和引线电阻。以上是较为常见的需要提取的寄生参数, 实际工作中在较高的频率下还有很多寄生效应难以通过上述参数体现出来。并且, 传统方法必须依赖于二极管的在片测试数据, 而目前可用于太赫兹频段的二极管即使有在片测试数据, 大多测试频率也较低。

改进型场路结合仿真的优势是通过三维场仿真将二极管的所有寄生参数和导电胶、放置二极管的腔体等因素考虑在S参数中, 以得到更加准确的总体仿真设计, 并且基本没有频率的限制。

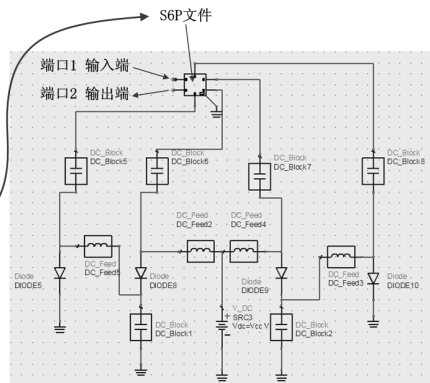


图4 场路结合仿真示意图

本文在二极管阳极处设置波端口, 将二极管置于最终装配的腔体及微带上进行仿真, 导出SNP文件(本文设计为S6P文件), 结合ADS仿真软件, 进行整体仿真, 如图4所示。二极管的各种寄生电容、电感、腔体及导电胶带来的寄生效应和不连续性被考虑进S6P文件, 二极管的非线性效应则由ADS中标准二极管模型结合谐波平衡法实现。

2.4 输入输出无源结构

由图1可知本文设计的倍频器在二极管对输入端之前有3个无源结构, 分别是输入波导-微带过渡以及两个低通滤波器。输入波导-微带过渡以及基波低通滤波器采用石英基片($\epsilon=3.78$), 直流偏置低通滤波器采用Rogers 5880基片($\epsilon=2.2$), 两块基片上的电路通过金丝连结。

石英基片上的波导-微带过渡采用E面探针形式, 主要作用为通过60~85 GHz的基波信号。基波低通滤波器采用H型低通滤波器, 设计截止频率为

50 GHz, 作用为通过基波信号, 且阻止二次、三次谐波返回输入端。直流偏置低通滤波器采用高低阻抗滤波器, 设计截止频率远低于60 GHz, 其作用为防止基波信号泄漏到直流馈电端口。上述3个无源部件均进行了单独的仿真设计, 然后整合为图5所示的输入部分。在66.5~81 GHz范围内, 回波损耗大于10 dB, 插损小于0.9 dB, 端口3与端口1、端口2隔离度大于30 dB, 1、2端口和1、3端口对二次谐波与三次谐波的隔离度均大于40 dB。仿真结果导出成为S3P文件代入ADS进行整体仿真。

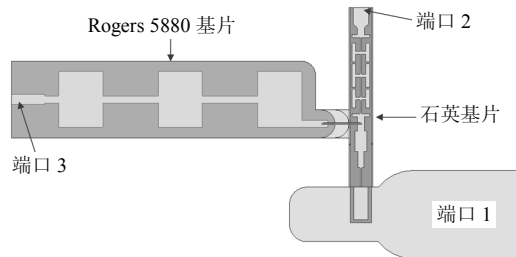


图5 输入部分HFSS模型

输出过渡也采用E面探针，减高波导尺寸为 $0.8\text{ mm}\times 0.4\text{ mm}$ ，计算得其主模截止频率为187 GHz，高于二次谐波。仿真模型见图6。在206~246 GHz内回波损耗大于20 dB，插损为0.1 dB。同样，该结果被导出为S2P文件，代入ADS中进行总体仿真。

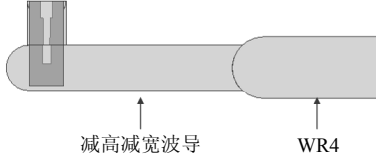


图6 输出探针HFSS模型

2.5 整体仿真优化

为了得到最佳的变频损耗，在二极管两端加入输入和输出匹配结构。匹配结构采用悬置微带线高低阻抗变换器。倍频器的整体仿真示意及输入和输出匹配网络如图7所示。在二极管的输入和输出两端分别增加了高低阻抗变换器作为倍频器的输入和输出匹配网络。以 $W1$ 、 $W2$ 、 $W3$ 、 $W4$ 和 $L1$ 、 $L2$ 、 $L3$ 、 $L4$ 为优化变量，变频损耗为优化目标，在ADS中进行谐波平衡仿真，经过反复多次迭代优化后，得到优化变量的尺寸参数。具体参数如表2所示。最终，在偏置电压为 -4.2 V ，输入功率为20 dBm时，最佳变频损耗如图8所示，在206~237 GHz范围内变频损耗小于15 dB，最佳变频损耗为10 dB。

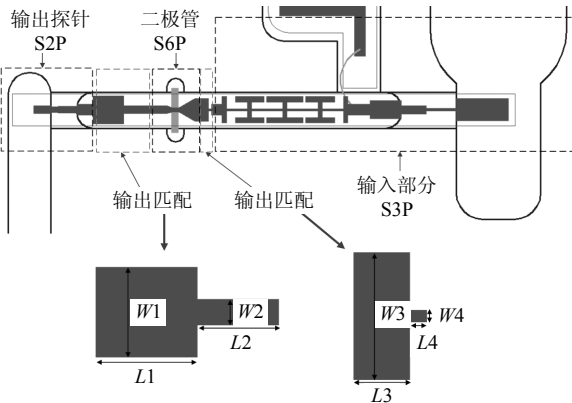


图7 整体仿真优化

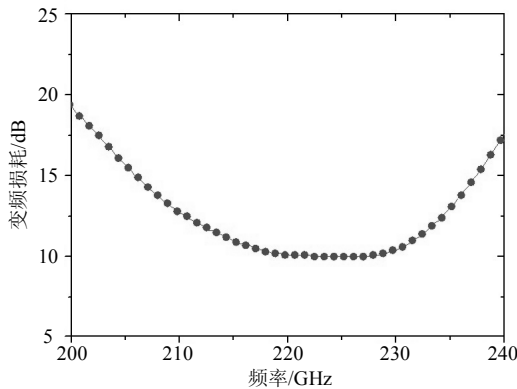


图8 变频损耗仿真结果

表2 匹配支节的参数优化值

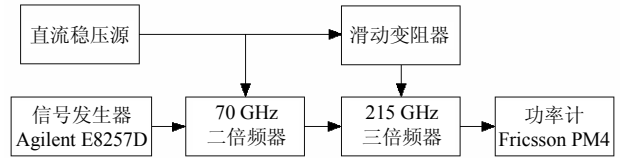
变量	$W1$	$W2$	$W3$	$W4$	$L1$	$L2$	$L3$	$L4$
值	260	80	220	20	290	230	90	30

3 测试与结果分析

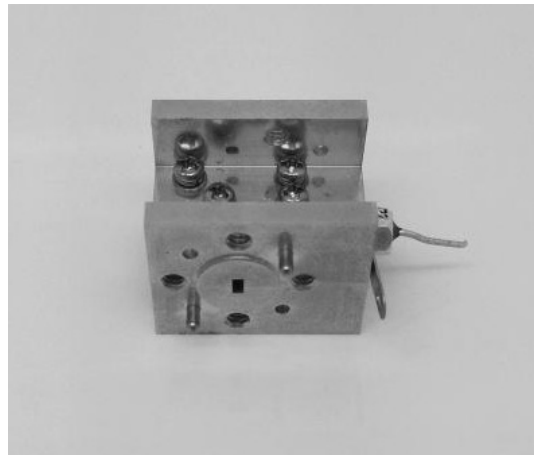
倍频器测试分为输出功率、变频损耗的测试和对二次谐波抑制度的测试两部分。

3.1 输出功率及变频损耗测试

测试平台包括信号源、自制V波段倍频放大模块、待测三倍频器、直流稳压源及功率计，如图9所示。图10展示了输出功率及变频损耗结果。倍频器最大功率点在211.5 GHz，为5.4 mW，最佳变频损耗为13.1 dB，在207~226 GHz范围内输出功率大于2 mW，变频损耗小于17 dB。

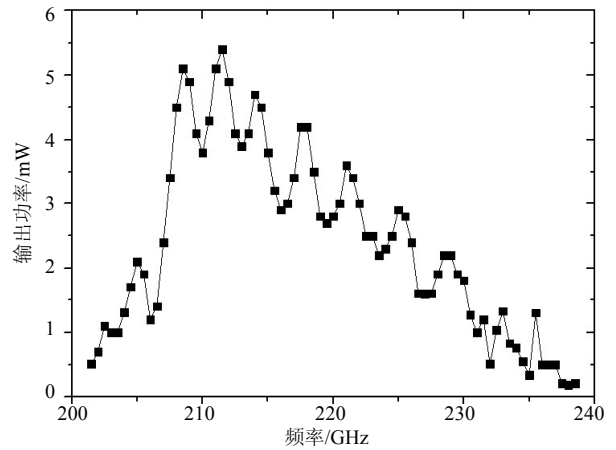


a. 测试框图

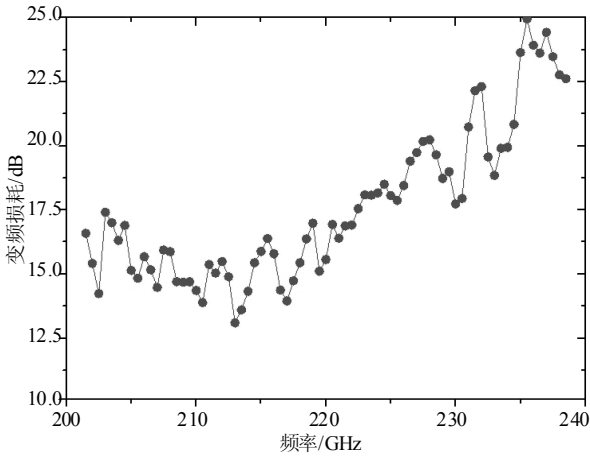


b. 三倍频器实物

图9 倍频器测试框图及实物照片



a. 输出功率



b. 变频损耗

图10 测试结果

表3 本文倍频器与国内其他倍频器比较

序号	中心频率/GHZ	倍频次数	最高功率/效率	文献	时间
1	140	2	11.2 mW/7.15 % 非同一点	14	2012.9
2	220	2	3.2 mW/3.2 %	15	2012
3	145	2	1.5 mW/3.3 %	16	2012.4
4	220	3	1.7 mW/1.78 % 非同一点	17	2013
5	183	5	15 μW	19	2012
6	215	3	5.4 mW/5 % 非同一点	本文	2014

输出功率曲线与变频损耗曲线有差别的原因在于自制的V波段倍频放大组件在66~80 GHz工作频带内输出波动较大, 其输出20 dBm以上的范围是69.5~76 GHz, 该范围外输出的功率较小。表3列出了本文倍频器与近年来国内研制的太赫兹倍频器^[11-17]的比较。

3.2 二次谐波抑制度

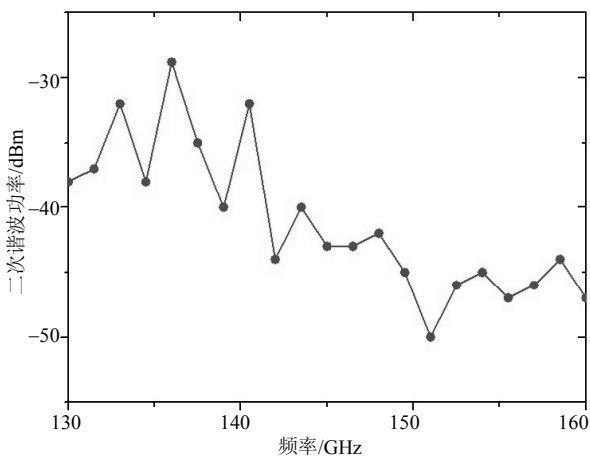


图11 二次谐波功率

因为测试倍频器功率采用的是功率计(Ericsson

PM4), 二次谐波分量有可能被计入最终功率, 所以采用Faran公司D波段(110~170 GHz)谐波混频器与频谱仪测试倍频器的二次谐波输出。测试结果如图11所示, 该结果表明本文倍频器有良好的谐波抑制度, 二次谐波抑制度大于40 dB。因此, 可认为二次谐波分量已经不会对三次谐波的测试产生影响。

4 结论

本文精确地建立了变容二极管的三维模型, 采用改进型的场路结合仿真方法对倍频器进行整体设计, 以混合集成方式研制了基于变容二极管的215 GHz三倍频器, 取得了较好的性能。该方法比传统的设计方法更为准确, 同时可以应用于太赫兹混频器、检波器的设计。

参 考 文 献

[1] FERGUSO B, 张希成. 太赫兹科学与技术研究回顾[J]. Physics, 2003, 32(5): 286-293.
 FERGUSO B, ZHANG Xi-cheng. Terahertz science and technology research review[J]. 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co Ltd, 2003, 32(5): 286-293.
 [2] CHOUDHURY D, FRERKING M A, BATELAAN P D. A 200 GHz tripler using a single barrier varactor[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1993, 41(4): 595-599.
 [3] ERICKSON N R. A high efficiency frequency tripler for 230 GHz[C]//Proc 12th Eur Microwave Conf. Helsinki: [s.n.], 1982.
 [4] ARCHER J W. An efficient 200 ~ 290 GHz frequency tripler incorporating a novel stripline structure[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1984, 32(4): 416-420.
 [5] JONES J R, BISHOP W L, JONES S H, et al. Planar multibarrier 80/240 GHz heterostructure barrier varactor triplers[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1997, 45(4): 512-518.
 [6] VUKUSIC J, ALDERMAN B, EMADI T A, et al. HBV tripler with 21% efficiency at 102 GHz[J]. Electronic Letters, 2006, 42(6): 355-356.
 [7] MĂLIQUE X, MANN C, MOUNAIX P, et al. 5 mW and 5% efficiency 216 GHz InP based heterostructure barrier varactor tripler[J]. IEEE Microwave Guided Wave Lett, 1998, 8: 384-386.
 [8] SCHWÖMLRER C, CAMPOS-ROCA Y, LEUTHER A, et al. A 150 to 220 GHz balanced doubler MMIC using a 50 nm metamorphic HEMT technology[C]//EGAAS 2005. [S.l.]: EGAAS, 2005.
 [9] OJEFORS E, HEINEMANN B, PFEIFFER U R. Active 220 and 325 GHz frequency multiplier chains in an SiGe HBT technology[J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2011, 59(5): 1311-1318.

- [10] TESSMANN A. 220 GHz metamorphic HEMT amplifier MMICs for high-resolution imaging applications[J]. IEEE J Solid-State Circuits, 2005, 40(10): 2070-2076.
- [11] AN Da-wei, YU Wei-hua. Design and analysis of a 2mm band tripler based on quartz[J]. J Infrared Millim Waves, 2011, 30(4): 377-380.
- [12] ZHANG Bo, FAN Yong, ZHONG Fu-qun, et al. A 225GHz Four-anode frequency tripler for wireless application[C]// IET International Communication Conference on Wireless Mobile& Computing. Shanghai: [s.n.], 2009.
- [13] LU Qiu-quan, YONG Zhang, LIU Wei, et al. Design of a 225 GHz frequency tripler using planar Schottky diode[C]//2012 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Shenzhen: [s.n.], 2012.
- [14] 缪丽, 邓贤进, 王成. 140GHz二倍频器的研制[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012, 11(3): 359-362.
MIAO Li, DENG Xian-jin, WANG Cheng. Implementation of 140 GHz frequency doubler[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012, 11(3): 359-362.
- [15] 钟富群. 固态太赫兹前端关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- ZHONG Fu-qun. The investigation on key technologies of solid THz states front-end[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.
- [16] 姚常飞. 微波毫米波混频与倍频技术及应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2012.
YAO Chang-fei. Research on millimeter wave mixer and multiplier technology and application[D]. Nanjing: Southeast University, 2012.
- [17] 张勇, 卢秋全, 刘伟. 基于肖特基势垒二极管三维电磁模型的220GHz三倍频器研究[J]. 红外与毫米波学报, 2014, 33(4): 405-411.
ZHANG Yong, LU Qiu-quan, LIU Wei. Design of a 220 GHz frequency triple based on EM model of Schottky diodes[J]. J Infrared Millim Wave, 2014, 33(4): 405-411.
- [18] PORTERFIELD D W. High-efficiency terahertz frequency triplers[C]//IEEE Intl Mic Symp. Honolulu, Hawaii: IEEE, 2007.
- [19] 王糅. 太赫兹波183GHz五次倍频技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
WANG Rou. Research on 183 GHz quintupler technology[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.

编辑 税红