

一种低功耗 245 GHz 次谐波接收机

毛燕飞^{1,2}, 鄂世举^{1*}, SCHMALZ Klaus³, SCHEYTT J. Christoph⁴

(1. 浙江师范大学 工学院, 浙江 金华 321000;

2. 东南大学 毫米波国家重点实验室, 江苏 南京 211189;

3. IHP, Microelectronics, Frankfurt Oder, 15236, Germany;

4. Heinz Nixdorf Institute, Paderborn University, 33102, Germany)

摘要:介绍了一种应用于气体频谱分析传感器的低功耗 245 GHz 次谐波接收机,该接收机具有低功耗、高线性度和高集成度的特点. 该接收机由四级共基极低噪声放大器、二次次谐波无源反接并联二极管对(APDP)混频器、120 GHz 推推型压控振荡器-分频器链路、120 GHz 功率放大器和中频放大器构成,采用了特征频率为 300 GHz、最大振荡频率为 500 GHz 的锗硅 BiCMOS 工艺实现. 该接收机芯片实现了 10.6 dB 的转换增益和 13 GHz 的带宽,噪声系数为 20 dB, 输入 1dB 压缩点仿真结果为 -9 dBm,接收机如果不包括 120 GHz 压控振荡器-功率放大器链路功耗为 99.6 mW,接收机包括 120 GHz 压控振荡器-功率放大器链路功耗为 312 mW.

关键词:245 GHz; 次谐波接收机; 锗硅 BiCMOS 工艺; 低功耗; 共基极低噪声放大器; 二次次谐波无源反接并联二极管对混频器; 中频放大器

中图分类号: TN433 文献标识码: A

A low power 245 GHz subharmonic receiver

MAO Yan-Fei^{1,2}, E Shi-Ju^{1*}, SCHMALZ Klaus³, SCHEYTTJ. Christoph⁴

(1. Engineering College, Zhejiang Normal University, Jinhua 321000, China;

2. State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 211189, China;

3. IHP, Microelectronics, Frankfurt Oder, 15236, Germany;

4. Heinz Nixdorf Institute, Paderborn University, 33102, Germany)

Abstract: A low power 245 GHz subharmonic receiver for gas spectroscopy sensor application has been proposed. The receiver is characterized by low power, high linearity and high integration level. The receiver consists of a four stage common base (CB) LNA, a 2nd passive APDP (anti-parallel diode pair) SHM (subharmonic mixer), a 120 GHz push-push VCO with 1/64 divider, a 120 GHz PA (power amplifier) and an IF (intermediate frequency) amplifier. The receiver is fabricated in a SiGe:C BiCMOS technology with $f_T/f_{max}=300/500$ GHz. The measured conversion gain is 10.6 dB at 245 GHz with 3-dB bandwidths of 13 GHz, noise figure is 20 dB, and simulated input referred 1 dB compression point is -9 dBm. The receiver dissipates a power of 99.6 mW without 120 GHz VCO-PA chain, and a power of 312 mW with the 120 GHz VCO-PA chain.

Key words: 245 GHz, subharmonic receiver, SiGe BiCMOS technology, low power, common base LNA, 2nd passive APDP SHM, intermediate frequency (IF) amplifier

PACS: 07. 57. Kp, 07. 57. Pt, 84. 40. Lj, 85. 25. Pb

收稿日期: 2019-05-08, 修回日期: 2019-09-20

Received date: 2019-05-08, Revised date: 2019-09-20

基金项目: 浙江省自然科学基金青年基金(LQ17F040001), 东南大学毫米波国家重点实验室开放项目(K201817)

Foundation items: Supported by the Zhejiang Provincial Natural Science Foundation Youth Fund (LQ17F040001), and State Key Laboratory of Millimeter Waves Open Project Fund, Southeast University, China (K201817)

作者简介(Biography): 毛燕飞(1983-), 女, 浙江义乌人, 博士, 主要研究领域为太赫兹、毫米波收发机芯片及天线设计. E-mail: yfmao@zjnu. cn

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: eshiju@163. com

引言

对工作带宽需求的不断增加,使射频电路工作频率进入毫米波和亚毫米波频率范围.近年来,硅基工艺如 CMOS 或 BiCMOS 技术,在频率高于 300 GHz 甚至更高的情况下显示出了其优异的性能.在文献[1]中,一个全差分的 220 GHz 集成接收机前端在锗硅 BiCMOS 工艺中实现;文献[2-3]中,针对 245 GHz 气体频谱分析的应用,提出了一种由 245 GHz 折叠偶极子天线、245 GHz 差分变压器耦合低噪声放大器、次谐波混频器(SHM)和 120 GHz 压控振荡器组成的接收机;该 245 GHz 接收机在 245 GHz 气体传感器^[4]和用于呼吸分析的气体光谱系统^[5]中得到应用;文献[6]提出了一种由×16 倍增器链路、IQ 混频器、功率放大器、低噪声放大器和片上天线组成的 240 GHz 全差分直接下变频正交接收机;文献[7]报道了一种用于成像的差分 210~270 GHz FMCW 接收机;文献[8]给出了一种应用于通信的 240 GHz 的混频器优先的差分直接下变频正交接收芯片,该芯片由×16 倍频器链路、IQ 混频器、功率放大器、正交耦合器和片上天线组成;在文献[9]中,报道了基于 130 nm 锗硅 BiCMOS 工艺的混频器优先的 220~275 GHz 直接下变频接收机,该接收机采用了跨阻型放大器电路作为负载以增大带宽;文献[10]提出了一种基于次谐波接收机的 320 GHz 锗硅 BiCMOS 工艺的混频器优先的接收机;文献[11]报道了基于 65 nm CMOS 工艺的混频器优先的 240 GHz 的速率为 16 Gbps 的 QPSK 调制接收机.

本文针对适用于便携式、小体积的气体频谱分析传感器的接收机展开研究.文献[12]中报道了一种基于 120 GHz 压控振荡器和倍频器的输出射频频率达 0 dBm 的 245 GHz 的高功率射频信号源.采用该射频信号源的便携式、小尺寸的气体频谱分析传感器要求实现低功耗、高线性度、高带宽、低噪声系数和高集成度集成本地振荡源以便连接外部锁相环 PLL 以实现芯片的 PCB 板级设计的接收机.

为了获得低功耗、高线性度、高增益、低噪声系数和高集成度集成本地振荡源以便连接外部锁相环 PLL 以实现芯片的 PCB 板级设计的应用于气体频谱分析传感器的 245 GHz 接收机,本文研究了基于共基极低噪声放大器、二次 APDP 无源次谐波混频器和中频放大器并且集成了本地振荡源 120 GHz 压控振荡器-功放链路的次谐波接收机.由于本文接收机的低噪声放大和混频器采用了单端结构,并且混

频器为无源混频器,因此本文接收机具有低功耗的特点.另外本文接收机混频器为接收机次末级电路,采用了具有负转换增益但是高线性度的无源反接并联二极管对次谐波混频器电路结构,因此本文接收机同时具有高线性度的特点.

1 电路设计

图 1 为 245 GHz 混频器优先的次谐波接收机的架构.它由四级共基极低噪声放、二次次谐波无源反接并联二极管对(APDP)混频器、中频放大器、120 GHz 推推型压控振荡器-分频器链路和 120 GHz 功率放大器构成.1/64 分频器便于连接外部锁相环 PLL 以实现芯片的 PCB 板级设计.120 GHz 压控振荡器-功率放大器链路为接收机提供了本地振荡信号.

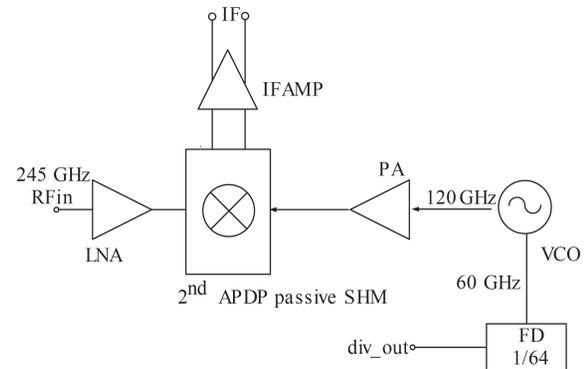


图 1 245 GHz 次谐波接收机的架构

Fig. 1 Architecture of the 245 GHz subharmonic receiver

图 2(a)给出了单级共基极低噪声放原理图。 V_{ch} 通过二极管连接的晶体管 D1 和电阻 R1 为共基极低噪声放大管的基极提供偏置电压.传输线 TL_{sh} 为放大管发射极提供直地,同时与传输线 TL_{scr} 和 MIM 电容一起构成了低噪声输入和级间阻抗匹配网络.传输线 TL_{load} 为共基极低噪声放的感性负载. C_{byp} 为共基极低噪声放大管基极和直流电源提供了交流地.焊盘电容也考虑在低噪声输入输出阻抗匹配网络的设计中.

图 2(b)给出了二次无源反接并联二极管对 (APDP) 次谐波混频器的原理图.反接并联二极管对是混频器核心的混频器件.在左侧射频 RF 信号输入端,传输线 TL1 是一个关于 120 GHz 本振 LO 信号的四分之一波长开路线,该开路线对 120 GHz 本振信号短路和而对 245 GHz 射频 RF 信号为开路.同样地,在右侧本振 LO 信号输入端口,传输线 TL2

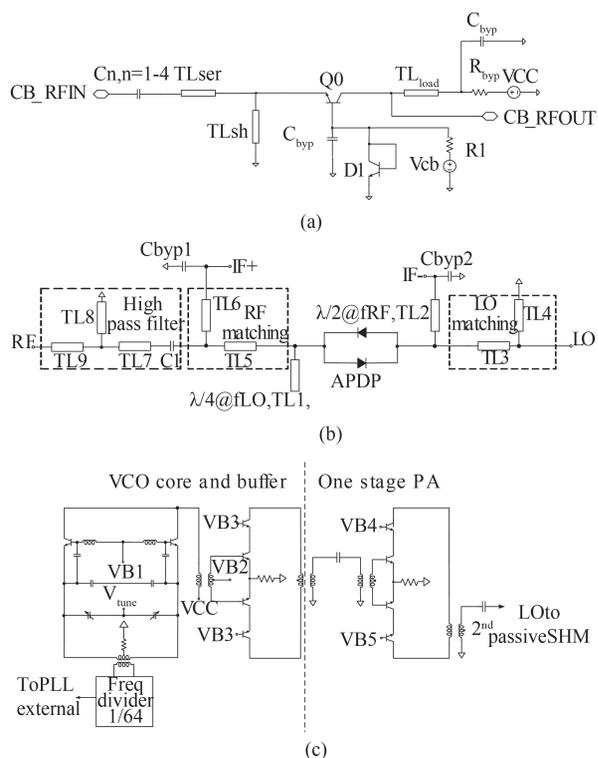


图2 次谐波接收机模块电路图(a)单级245 GHz共基极低噪放原理图(b)二次被动型反接并联二极管对(APDP)次谐波混频器电路原理图(c)120 GHz压控振荡器-功率放大器链路电路原理图

Fig.2 Block diagrams of subharmonic receiver (a) schematic of a single stage of the 245 GHz CB LNA (b) schematic of 2nd passive APDP SHM (c) schematic of 120 GHz VCO-PA chain

是一个关于射频RF信号的半波长短路线,该短路线对射频RF信号处形成接地,对本振LO信号开路.四分之一波长开路TL1和半波长短路线TL2实现了射频RF信号和本振LO信号的隔离.传输线TL3和TL4构成本振LO信号的阻抗匹配网络.传输线TL5和TL6构成射频RF信号匹配网络.在射频RF信号输入端同时设计了一个由传输线TL7、TL8、TL9和电容C1组成的高通滤波器,该高通滤波器不仅允许射频RF信号通过,同时抑制了中频频率IF,防止中频泄漏到射频端口.该混频器中的传输线对于中频信号IF尺寸足够小,因此对于中频信号IF基本没有影响,中频信号通过通过旁路电容器 C_{byp1} 和 C_{byp2} 以差分方式从反接并联二极管对的两侧提取.

在图2(c)中,给出了压控振荡器-功率放大器链路的电路原理图.为了满足调谐范围、功率和可靠性方面的要求,压控振荡器选择了推推型振荡器的拓扑结构.该压控振荡器可以向分频器提供60 GHz的用于分频的基频信号,同时通过缓冲放大器

向120 GHz的功率放大器提供120 GHz本振LO信号.120 GHz功率放大器采用一级变压器耦合的差分共射共基电路结构.

中频放大器采用两级差分共发射极放大器电路.中频放大器的最后一级利用50欧姆电阻作为差分负载进行输出匹配;在第一级和第二级之间,采用差发射极跟随器作为缓冲级;为了提高中频放大器的带宽,级间采用直接耦合的方式.

在次谐波混频器的本振LO信号端口和压控振荡器-功率放大器链路的本振LO信号端口的接口处,各个端口的阻抗首先匹配到50 Ω ,然后将两个端口直接连接.

图3是为245 GHz次谐波接收器的版图,各个电路模块如图所标示.接收机芯片尺寸为1.9 mm \times 1.0 mm.芯片采用了德国莱布尼兹研究所联盟下的高性能创新微电子研究所(IHP-Innovations for High Performance Microelectronics)的锗硅BiCMOS工艺实现.接收机低噪放、混频器、功放、压控振荡器等电路中晶体管皆采用了该工艺中截止频率(f_T)和最大振荡频率(f_{max})各为300 GHz和500 GHz的NPN型晶体管实现.混频器反接并联二极管对中的二极管也是由该NPN型晶体管连接成二极管形式构成.

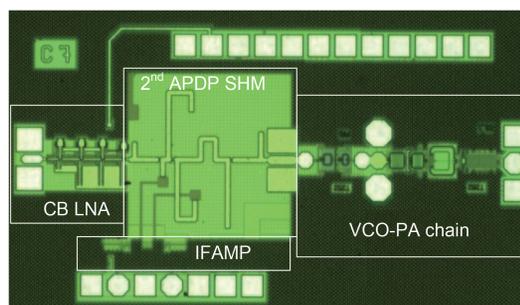


图3 245 GHz次谐波接收器的版图

Fig.3 Layout of 245 GHz subharmonic receiver

2 混频器优先的次谐波接收机及其模块电路块的测试结果

四级共基极低噪放电源电压为2V,电流为24.8 mA,基极偏置电压为2.1V,电流为2.5 mA;中频放大器电压为2.5V,电流为17.9 mA;功率放大器电压为4V,消耗电流为31 mA;压控振荡器电压为3.3V,电流为27 mA;因此整个次谐波接收机芯片如果含本振耗电为312 mW,如果不含本振功耗为99.6 mW.

120 GHz压控振荡器和压控振荡器-功率放大

器链路同时作为独立的电路模块流片并进行单独测量.

当调谐电压 V_{tune} 从 0 V 增加到 3 V, 压控振荡器本振 LO 信号的频率从 116.9 GHz 变化到 126.4 GHz. 当调谐电压 V_{tune} 为 1.5 V 时, 本振信号频率为 122 GHz, 输出功率为 -1 dBm, 在 1 MHz 频偏处相位噪声为 -92 dBc/Hz. 为了清楚描述压控振荡器-功率放大器链路, 图 4 给出了压控振荡器-功率放大器链路的输出功率与本振 LO 信号频率范围的关系. 从图 4 可见, 当本振 LO 信号为 122 GHz 时, 压控振荡器-功率放大器链路的输出功率为 6.5 dBm.

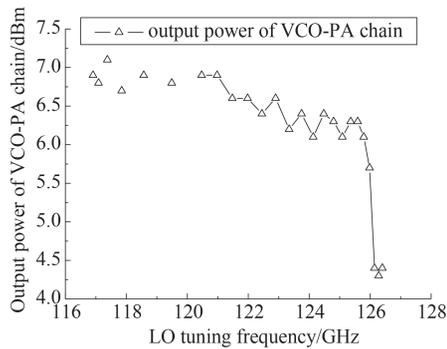


图 4 压控振荡器-功率放大器链路输出本振信号功率 vs 本振信号频率

Fig. 4 Output power of VCO-PA chain versus LO tuning range

图 5 显示当压控振荡器调谐电压 V_{tune} 固定时, 本振 LO 信号频率固定为 122 GHz 时, 扫描输入射频 RF 信号的频率时得到的次谐波接收机的转换增益仿真和测试结果. 当射频 RF 信号频率接近 244 GHz 时, 接收机的转换增益为 12.5 dB, 3 dB 射频带宽为 242.5 ~ 245.5 GHz. 该有限的中频带宽是由于次谐波混频器中旁路电容器 C_{byp1} 和 C_{byp2} (2 pF) 的滤波造成的.

图 5 同时显示改变调谐电压 V_{tune} , 同时改变射频 RF 信号和本振 LO 信号的频率, 保持中频 IF 频率为 1 GHz, 次谐波接收机得到的转换增益的仿真和测试结果. 从图 5 可见, 接收机转换增益为 10.6 dB, 由于 120 GHz 振荡器的调谐范围的限制, 3 dB 带宽为 13 GHz, 射频 RF 信号范围为 236 ~ 249 GHz.

图 5 中仿真和测试结果趋势一致, 但是在 3 dB 带宽内存在 6 dB 左右的差异, 这可能是由于低噪放与混频器之间阻抗失配, 以及混频器与中频放大器之间阻抗失配造成增益损耗; 图 5 中在射频信号频

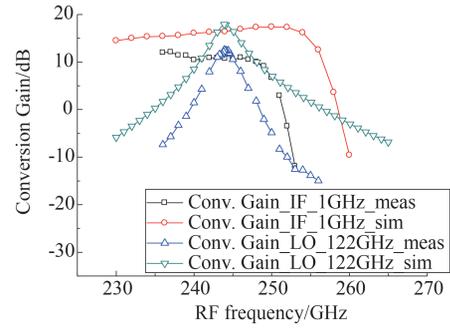


图 5 次谐波接收机转换增益 vs 射频信号频率

Fig. 5 Conversion gain of subharmonic receiver versus RF frequency

率高于 249 GHz 的频段, 仿真与测试结果差异迅速增大, 这可能是一方面由于低噪放与次谐波混频器级联后带宽变窄, 另一方面可能由于晶体管管子建模不够准确导致次谐波混频器的转换增益随频率迅速下降.

对于该次谐波接收机, 本振信号频率为 122 GHz, 中频信号频率为 1 GHz 时, 相应的射频信号频率为 245 GHz, 当射频信号输入端无输入信号并且阻抗匹配时, 在中频信号输出端获得 -143.4 dBm/Hz 的输出噪声功率, 由于转换增益为 10.6 dB, 计算可得该接收机的单边带噪声 (SSB NF) 系数为 20 dB. 图 6 给出了次谐波接收机噪声系数的仿真和测试结果.

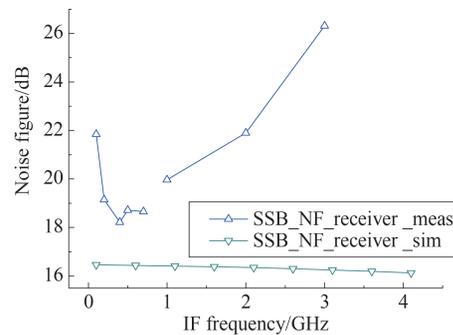


图 6 噪声系数 vs 中频信号频率

Fig. 6 Noise figure versus IF frequency

接收机仿真得到的输入 1 dB 压缩点为 -9 dBm. 在本文的测量设备中 245 GHz 射频信号源最大输出功率限制为 -15 dBm. 今后将对输入 1 dB 压缩点进行进一步测量.

中频放大器仿真结果为宽带低通型放大器, 中频 1 GHz 处增益为 21 dB, 3 dB 带宽约为 19 GHz. 因此图 5 中, 当压控振荡器调谐电压 V_{tune} 固定, 本振 LO 信号频率固定为 122 GHz 时, 接收机具有有限的中

频带宽是由于次谐波混频器中旁路电容器 C_{byp1} 和 C_{byp2} (2 pF)的滤波造成的. 在245 GHz频点处,四级共基极低噪放增益测试结果为11 dB^[13],二次被动型反接并联二极管对(APDP)次谐波混频器转换增益测试结果为-17 dB,根据次谐波接收机的增益分配,可以计算得到中频放大器的增益约为16.6 dB.

图7所示为次谐波接收机测试系统图. 在图7中,四端口网络分析仪ZVA6F向频率扩展器Z325提供射频信号RF/18和(RF/16-279MHz/16),通过频率扩展器Z325相乘得到245 GHz的射频信号. 245 GHz射频信号通过波导转换S-band WR 3.4和探针WR 3.4-GSG-50馈入被测设备. 120 GHz LO信号由VDI AMC 326和探针VR 8.0提供. VDI AMC 326是一个12×倍频链路,LO/12信号由矢量网络分析仪直接提供. 下变频后的中频信号显示在频谱分析仪FSV30上. 频谱分析仪FSV30具有窄带的带宽(最高160 MHz分析带宽,测试中采用了10 MHz的分析带宽),对中频信号进行滤波,从而提高该气体频谱分析仪的频率分辨率. 直流探针MCW-14为片上芯片测量提供直流偏置.

表1对该次谐波接收机与研究现状进行比较. 本文的次谐波接收机与文献[1,6,8-9]的接收机相比较,有相当的转换增益、噪声系数和带宽性能,但是功耗远低于文献[1,6,8-9]的接收机,并且线性度也远好于文献[1,6,8-9]的接收机. 本文的接收机如果不包含本振信号相关电路功耗仅为99.6 mW,是文献[1]接收机功耗的一半,文献[1]接收机也不包含本振信号相关电路;本文接收机包含本振相关电路功耗为312 mW,与文献[6,8-9]接收机相比,本文接收机功耗仅为文献[6,8-9]接收机功耗

的一半,文献[6,8-9]接收机也包含本振倍频模块,但是振荡信号由片外给出. 本文接收机与文献[2-3]接收机都包含了本振信号相关电路,本文接收机转换增益较低,但是由于接收机采用了单端结构,功耗远低于文献[2-3]接收机,并且线性度远好于文献[2-3]. 本文接收机线性度远好于文献[1-3,6,8-9]是由于位于次末级的混频器采用了具有低转换增益但是高线性度的无源反接并联二极管对次谐波混频器电路结构. 本文接收机与文献[11]接收机相比,采用不同工艺实现,都包含了本振相关电路,文献[11]接收机增益更高,功耗更低,但是文献[11]接收机振荡信号由片外给出,因此本文接收机具有更高的集成度. 本文的接收机与文献[1-3,6,8-9,11]相比,有相当的噪声系数,但是略微高于文[1-3,6,8-9,11]中接收机的噪声系数,这主要是由于第二级的无源次谐波混频器的增益损耗,无法抑制后级电路的噪声造成的. 从以上比较可以看出,本文的接收机具有高线性度、高增益、高带宽、低噪声系数和高集成度的特点,并且功耗较低,综合性能优越,适用于便携式,小体积,要求低功耗、高线性度、高增益、高带宽、低噪声系数和高集成度等性能的气体频谱分析传感器的应用场景.

3 结论

本文介绍了一种应用于245 GHz气体频谱分析应用的次谐波接收机,该接收机由四级共基极低噪放、二次次谐波无源反接并联二极管对(APDP)混频器、中频放大器、120 GHz推推型压控振荡器-分频器链路和120 GHz功率放大器构成. 该接收机在245 GHz具有10.6 dB的转换增益,带宽为13 GHz,输入1 dB压缩点仿真结果为-9 dBm. 该次谐波接收

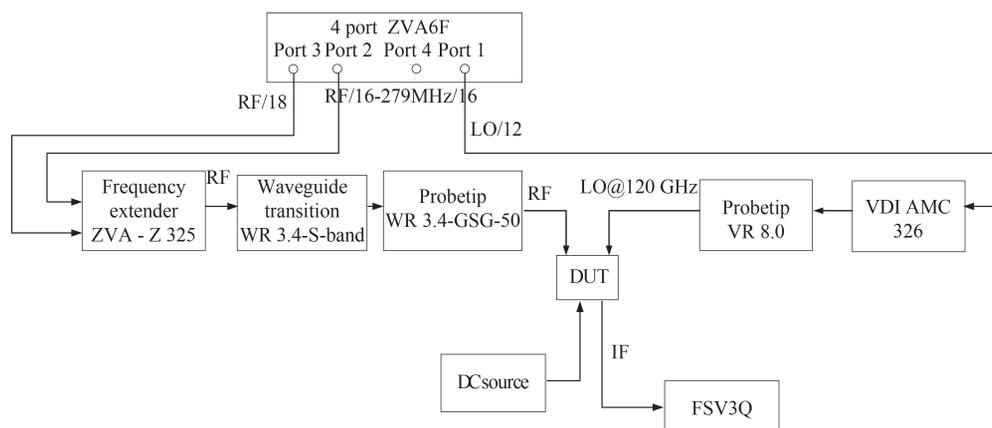


图7 次谐波接收机测试系统图

Fig. 7 Setup diagram of subharmonic receiver measurement system

表 1 研究现状对比

Table 1 Comparison of state of the art

	RF /GHz	F_T/f_{\max} (GHz)	工艺	集成度	转换 增益 /dB	功耗/mW	输入 1 dB 压 缩点 /dBm	噪声 系数 /dB	带宽 /GHz
[1]	220	280/435	SiGe BiCMOS	低噪放,混频器	16	216	-	18	25
[2-3]	245	300/500	SiGe BiCMOS	低噪放,混频器,120 GHz 压控振荡器,分频器,本振缓冲器,片上天线	18	712.3	-25	18	-
[6]	240	350/550	SiGe BiCMOS	巴伦,×16 倍频器链路,混频器,功率放大器,低噪放,片上天线	10.5	986	-18	15	17
[8]	240	350/550	SiGe BiCMOS	巴伦,×16 倍频器链路,混频器,功率放大器,正交耦合器,缓冲器,片上天线	7.8	915.8	-	11.3	47
[9]	240	300/500	SiGe BiCMOS	TIA,本振倍频器链路(片外本振源)	13	500	-	18	55
[11]	240	-	CMOS	天线,混频器,本振倍频器链路,基带放大器	25	260	-	15	-
本文	245	300/500	SiGe BiCMOS	四级共基极低噪放,反接并联二极管对混频器,中频放大器,120 GHz 压控振荡器,分频器,120 GHz 功率放大器	10.6	99.6/312 (不含本振/含本振)	-9 (sim)	20	13

机具有高线性度、低功耗、高集成度等特点,具有优越的综合性能,适用于便携式,小体积,要求低功耗、高线性度、高增益、高带宽、低噪声系数和高集成度等性能的气体频谱分析传感器应用场景。

References

- [1] Öjefors E, Heinemann B, Pfeiffer U R. A 220GHz subharmonic receiver front end in a SiGe HBT technology: IEEE RFIC, 2011[C]. Baltimore, MD, USA: IEEE, 2011: 1-4.
- [2] Schmalz K, Borngräber J, Wang R, et al. Subharmonic 245 GHz SiGe receiver with antenna: European Microwave Integrated Circuit Conference, 2013[C]. Nuremberg, Germany: IEEE, 2013: 121-124.
- [3] Schmalz K, Wang R, Mao Y, et al. 245 GHz SiGe sensor system for gas spectroscopy: 44th European Microwave Conference, 2014 [C]. Rome, Italy: IEEE, 2014: 644-647.
- [4] Schmalz K, Borngräber J, Yilmaz J B, et al. Gas spectroscopy with 245 GHz circuits in SiGe BiCMOS and Frac-N PLL for frequency ramps, IEEE SENSORS, 2016[C]. Orlando, FL, USA: IEEE, 2016: 1-3.
- [5] Schmalz K, Rothbart N, Neumaier P F X, et al. Gas spectroscopy system for breath analysis at mm-wave/THz using SiGe BiCMOS circuits[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017, 65(5): 1807-1818.
- [6] Sarmah N, Grzyb J, Statnikov K, et al. A fully integrated 240 GHz direct conversion quadrature transmitter and re-

ceiver chipset in SiGe technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64(2):562-574.

- [7] Janusz G, Konstantin S, Neelanjan S, et al. A 210-270 GHz circularly polarized FMCW radar with a single-lens-coupled SiGe HBT chip[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2016, 6(6): 771-783.
- [8] Vazquez P R, Grzyb J G, Sarman N, et al. A 219-266 GHz fully-integrated direct conversion IQ receiver module in a SiGe HBT technology, IEEE EuMA, 2017 [C]. Nuremberg, Germany: IEEE, 2017: 261-264.
- [9] Eissaa M H, Awany A, Ko M, et al. A 220-275 GHz direct conversion receiver in 130 nm SiGe : C BiCMOS technology [J]. IEEE Microwave Component and Wireless Components Letters, 2017, 27(7): 675-677.
- [10] Öjefors E, Heinemann B, Pfeiffer U R. Subharmonic 220- and 320-GHz SiGe HBT receiver front-ends [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60(5):1397-1404.
- [11] Thyagarajan S V, Kang S, Niknejad A M. A 240 GHz fully integrated wideband QPSK receiver in 65 nm CMOS [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2015, 50(10): 2268-2280.
- [12] Schmalz K, Borngräber J, Heinemann B, et al. A 245 GHz transmitter in SiGe technology, IEEE RFIC, 2012 [C]. Montreal, QC, Canada: IEEE, 2012:195-198.
- [13] Mao Y, Schmalz K, Borngräber J, et al. 245-GHz LNA, mixer, and subharmonic receiver in SiGe technology [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60(12): 3823-3833.