

文章编号: 2095-4980(2020)03-0358-06

## 245 GHz 接收机芯片片外测试与实验

毛燕飞<sup>1,2</sup>, 鄂世举<sup>\*1</sup>, SCHMALZ Klaus<sup>3</sup>, SCHEYTT J Christoph<sup>4</sup>, 颜素莉<sup>1</sup>

(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:** 为了实现太赫兹气体频谱分析传感器, 对245 GHz次谐波接收机芯片的片外测试展开研究。建立了245 GHz次谐波接收机片外测试系统以及基于245 GHz接收机芯片及发射机芯片的气体频谱分析传感器片外展示测试系统, 对245 GHz次谐波接收机芯片转换增益和带宽进行测试。片外测试系统得到15 dB转换增益和15 GHz带宽; 片外展示测试系统得到9 dB转换增益和16 GHz带宽。片外测试系统和片外展示测试系统结果基本吻合。在片外展示测试系统中加入气腔, 即构成气体频谱分析传感器。与现有同类型传感器相比, 本文的次谐波接收机具有高增益、高带宽、集成本地振荡信号、低功耗等优势, 非常适用于消费电子领域小体积的智能气体频谱分析传感器。

**关键词:** 245 GHz次谐波接收机; 片外测试系统; 片外展示测试系统; 气体频谱分析传感器系统; 高增益; 高带宽; 低功耗

中图分类号: TN859; TN433

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019180

## Off-chip measurement and experiment of 245 GHz receiver chip

MAO Yanfei<sup>1,2</sup>, E Shiju<sup>\*1</sup>, SCHMALZ Klaus<sup>3</sup>, SCHEYTT J Christoph<sup>4</sup>, YAN Suli<sup>1</sup>

(1.Engineering College, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang 321000, China;  
2.State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing Jiangsu 211189, China;  
3.IHP, Microelectronics, Frankfurt Oder, 15236, Germany;  
4.Heinz Nixdorf Institute, Paderborn University, 33102, Germany)

**Abstract:** In order to realize THz gas spectroscopy system, researches upon off-chip measurement of 245 GHz subharmonic receiver chip are conducted. An off-chip measurement system for 245 GHz subharmonic receiver chip is established and an off-chip demonstrator measurement system for gas spectroscopy sensor based on 245 GHz receiver and transmitter chips is fabricated to measure the conversion gain and bandwidth of the 245 GHz subharmonic receiver chip. 15 dB conversion gain and 15 GHz bandwidth are obtained in off-chip measurement system, and 9 dB conversion gain and 16 GHz bandwidth are obtained in off-chip measurement demonstrator system. Experimental results indicate that the results of off-chip measurement system and off-chip measurement demonstrator system of 245 GHz subharmonic receiver chip are basically consistent. A THz gas spectroscopy sensor is constructed when a gas chamber filled with some specific kind of gas is added into the off-chip demonstrator measurement system. Compared with available gas spectroscopy of the same type, the subharmonic receiver chip has advantages of high gain, wide bandwidth, being integrated with local oscillation signals, and low power consumption, and is very suitable for applications of low volume intelligent gas spectroscopy in consumer electronics.

**Keywords:** 245 GHz subharmonic receiver; off-chip measurement system; off-chip demonstrator measurement system; gas spectroscopy sensor system; high gain; wide bandwidth; low power consumption

收稿日期: 2019-05-18; 修回日期: 2019-07-06

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

作者简介: 毛燕飞(1983-), 女, 博士, 讲师, 主要从事射频、微波及太赫兹收发芯片及天线的研究。email:yfmao@zjnu.cn

\*通信作者: 鄂世举 email:eshiju@163.com

2004 年美国政府将太赫兹(THz)技术(0.1~10 THz)列为“改变未来世界的十大技术”之一。太赫兹成像技术、太赫兹波谱技术、太赫兹通信技术是太赫兹技术领域的几大研究方向。在太赫兹成像方面,由于太赫兹能量很小,不会对物质产生破坏作用,所以与 X 射线相比更具有优势,太赫兹成像技术可用于安检、医学皮肤烧伤及眼科角膜成像、乳腺癌检测、爆炸物识别、高分辨率的调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)雷达成像等<sup>[1-3]</sup>。在太赫兹波谱技术方面,由于分子的振动和转动频率的共振频率均在太赫兹波段,因此太赫兹技术在气体成分分析<sup>[4-6]</sup>、分析化学、毒品及爆炸品检测等工业、农业、生物医药等行业有着良好的应用前景<sup>[7-8]</sup>。在太赫兹通信方面,太赫兹技术适用于近距离高速传输、无线个人局域网通信等,内在的宽频特性使得太赫兹波段即使在简单的调制方式下也可以获得高传输速率,出现了在 240 GHz 频段及 300 GHz 频段使用幅度键控(Amplitude Shift Keying, ASK)、正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)、正交振幅调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)等调制方式的高速传输接收发射机<sup>[9-11]</sup>。

为了实现太赫兹气体频谱分析传感器,本文对 245 GHz 次谐波接收机芯片的片外测试展开研究。在 245 GHz 频段,245 GHz 射频信号对于特定温度、压强的气体具有特定的吸收谱,因此通过判断气体的吸收谱,可以判断该特定气体成分。本文介绍了一种基于锗硅 BiCMOS 工艺的集成片上天线的应用于气体频谱分析传感器的次谐波接收机,该 245 GHz 次谐波接收机具有低功耗、宽带、集成本地振荡(Local Oscillator, LO)信号、易于实现外部锁相环(Phase-Locked Loop, PLL)的板级设计等特点。本文利用该 245 GHz 次谐波接收机建立了 245 GHz 集成片上天线的次谐波接收机片外测试系统和基于 245 GHz 接收机芯片及发射机芯片的气体频谱分析传感器片外展示测试系统,对该系统所采用的 245 GHz 次谐波接收机芯片的转换增益、带宽进行研究。在片外展示测试系统的 245 GHz 发射机和接收机之间加入充有特定气体的气腔,即构成了太赫兹气体频谱分析传感器。

## 1 245 GHz 次谐波接收机芯片片外测试系统的构成及其工作原理

### 1.1 245 GHz 次谐波接收机的架构及各个模块片上测试结果

图 1 为该 245 GHz 次谐波接收机芯片的架构<sup>[12-13]</sup>。该芯片由 245 GHz 折叠偶极子天线、4 级 245 GHz 共基级低噪声放大器(Common Base Low Noise Amplifier, CB LNA)、二次跨导型次谐波混频器(Sub-Harmonic Mixer, SHM)和包含 1/64 分频器的 120 GHz 推推式压控振荡器(Voltage Controlled Oscillator, VCO)组成。采用 1/64 分频器有利于连接外部锁相环 PLL 电路以实现芯片的 PCB 板级设计。表 1 为该接收机芯片各个模块的片上测试(基于晶圆的片上测试)结果的主要性能指标的一个小结<sup>[12,14]</sup>。

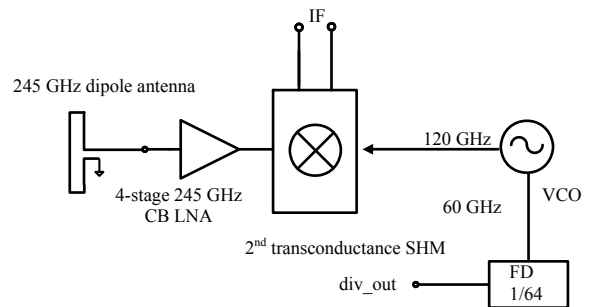


Fig.1 Architecture of the 245 GHz subharmonic receiver  
图 1 245 GHz 次谐波接收机架构

表 1 接收机芯片各个模块的片上测试结果

Table1 On-chip measurement results of each module of the receiver

CB LNA	SHM	VCO	frequency divider	dipole antenna	receiver
gain:12 dB@245 GHz, 11dB@245 GHz(sim)	conversion gain: 3 dB@245 GHz	output power:-1 dBm@122 GHz phase noise:-88 dBC/Hz@1 MHz	working at 60 GHz	gain: 6 dBi@245 GHz	conversion gain:15 dB@245 GHz noise figure:17 dB

### 1.2 245 GHz 次谐波接收机片外测试系统的硬件构成

图 2 为 245 GHz 次谐波接收机片外测试系统原理图(芯片从晶圆上切割后进行测试)。主要由矢量网络分析仪 R&S ZVA67、频率扩展器 ZVA-Z325、喇叭天线  $\alpha$ -标准 WR-3.4、频谱分析仪 FS3Q、直流源、被测件等构成。

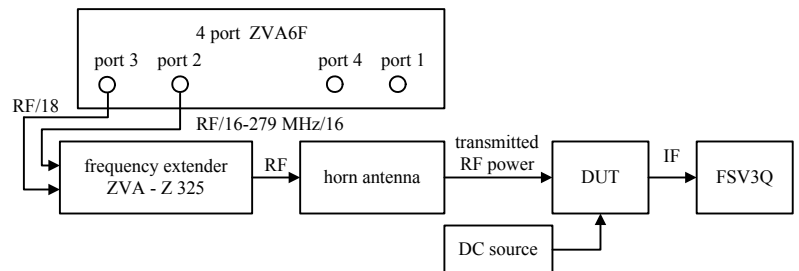


Fig.2 Block diagram of off-chip measuring system of 245 GHz subharmonic receiver  
图 2 245 GHz 次谐波接收机片外测试系统原理图

### 1.3 245 GHz 次谐波接收机片外测试系统的工作原理

该系统的基本工作原理为:带有片上天线的次谐波接收机的芯片被粘贴在 FR-4 材质的 PCB 板上以便于展开片外测试。频率扩展器 ZVA-Z325 将矢量网络分析仪 R&S ZVA67 馈入的射频信号 RF/18 和 RF/16-279 MHz/16 上变频得到 245 GHz 射频信号,并将 245 GHz 射频信号馈送入  $\alpha$ -标准 WR-3.4 喇叭天线。喇叭天线将 245 GHz

射频信号无线发射到接收芯片。接收芯片通过片上天线接收 245 GHz 射频信号，接收机的本振信号由接收机集成的 122 GHz 压控振荡器生成，对 245 GHz 射频信号进行下变频，在频谱分析仪 FS3Q 上展示得到中频信号。直流探头 MCW-14 为被测件提供直流偏置。

由图 2 可知，通过同时改变压控振荡器的频率和网络矢量分析仪提供的射频信号的频率，可以使输出中频信号保持在固定中频频率，并通过频谱分析仪测试得到固定中频信号的功率，再利用 Friis 传输方程可以计算得到次谐波接收机接收到的射频信号功率，中频信号功率与接收机接收到的射频信号功率之比即为接收机的转换增益。发射机与接收机 Friis 传输方程：

$$P_r = P_t \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi R)^2} \quad (1)$$

式中： $P_t$  为发射机功率； $G_t$  和  $G_r$  为发射和接收天线增益； $R$  为发射机与接收机之间的距离； $\lambda$  为波长。

## 2 245 GHz 次谐波接收机气体分析传感器片外展示测试系统的构成及其工作原理

### 2.1 245 GHz 次谐波接收机气体频谱分析传感器片外展示测试系统的硬件构成

图 3 为 245 GHz 次谐波接收机片外展示测试系统原理图。它主要由发射机模块 TX、接收机模块 RX 和无线信道三部分组成。发射机模块包括 245 GHz 集成振荡器的发射机芯片、片外锁相环 PLL 电路、直流电源供电模块、片外硅基镜头等。接收机模块包括接 245 GHz 次谐波接收机芯片、片外锁相环 PLL 电路、直流电源供电模块和频谱分析仪等。

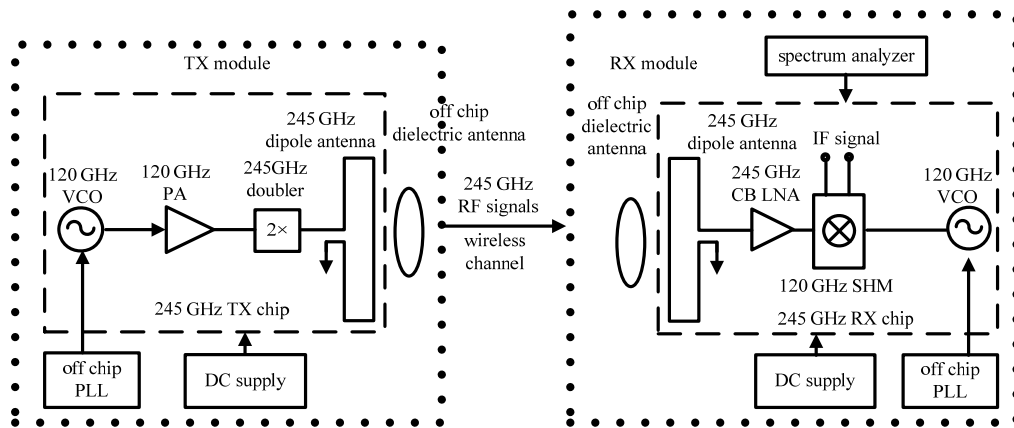


Fig.3 Block diagram of off-chip measuring demonstrator of 245 GHz subharmonic receiver

图 3 245 GHz 次谐波接收机片外展示测试系统原理图

### 2.2 245 GHz 次谐波接收机片外展示测试系统的工作原理

该系统的基本工作原理为：对于 RX 接收机板，245 GHz 的接收器芯片焊接在插件板上，然后把插件板安装在含锁相环(ADF4007)的接收机载体板上。对于 TX 发射机板，245 GHz 的发射机芯片也焊接在插件板上，然后与锁相环 PLL 设备一起安装在发射机载体板上。对于发射机载体板 TX 和接收机载体板 RX，为了改善增益，增加了片外介质天线。透镜由高密度聚乙烯制成，介电常数  $\epsilon_r=2.32$ ，直径为 40 mm，焦距为 25 mm，它是具有 2 个折射面的平凸型。调整透镜的焦点距离可用于整片上天线-介质镜头链路增益组合。

发射机和接收机的压控振荡器由 2 个锁相环控制以获得固定的中频。用于发射机和接收机锁相环的 2 个参考信号来自 2 个高质量信号发生器(罗德施瓦兹的 SML01)。通过同时改变 2 个锁相环的参考信号频率获得固定的中频频率。中频功率由频谱分析仪测试得到。通过 Friis 传输方程(1)，可以计算得到接收机接收到的 245 GHz 射频信号功率，中频功率与 245 GHz 射频信号功率之比即为接收机的转换增益。

## 3 测量实验与结果

### 3.1 245 GHz 次谐波接收机片外测试系统的测试结果

图 4 是 245 GHz 次谐波接收机片外测试系统的实物图。带有片上天线的次谐波接收机的芯片被粘贴在 PCB 板上，频率扩展器 ZVA-Z325 上变频得到 245 GHz 射频信号，并将 245 GHz 射频信号馈送入喇叭天线，喇叭天线正对 PCB 板上的接收机芯片，将 245 GHz 射频信号无线发射到接收芯片。接收芯片通过片上天线接收 245 GHz

射频信号，对 245 GHz 射频信号进行下变频，在频谱分析仪上展示得到中频信号。

利用上述片外测试系统，同时改变接收机本振信号的频率和矢量网络分析仪 R&S ZVA67 馈入的射频信号的频率，将中频频率 IF 固定在 250 MHz，通过频谱分析仪测量中频输出功率。根据式(1)，已知发送功率  $P_t$ ，发射和接收天线增益  $G_t$  和  $G_r$ ，天线之间距离  $R$ ，射频信号波长  $\lambda$ ，可以计算得到接收机输入的射频信号功率  $P_r$ 。

喇叭天线增益  $G_t$  为 20 dBi，接收机片上天线  $G_r$  为 7 dBi，喇叭天线和芯片之间的距离是 10 cm，根据式(1)，接收机接收到的射频信号功率  $P_r$  为  $(P_t-33.22)$  dBm。因此，接收机的转换增益可以通过从接收到的中频信号 IF 功率(dBm)中减去射频信号功率  $P_r$  得到。测试结果见图 5，根据片外测试结果，次谐波接收机具有 15 dB 的转换增益和 15 GHz 的带宽，而功耗仅为 288 mW。在图 5 中，在频带 245~260 GHz 内，除了 2 个频率点转换增益突然下降到 10 dB 以下，转换增益波动几乎保持在 4 dB 带宽内。转换增益的突然下降可能是由于系统校准误差、射频信号的多径损耗等传输效应导致。

### 3.2 245 GHz 次谐波接收机片外展示测试系统测试结果

将 TX 模块和 RX 模块安装在可以移动的光学工作台上，搭建片外气体频谱分析传感器展示测试系统进行测量，见图 6。通过同时改变 RX 和 TX 模块 2 个锁相环的参考信号频率获得固定的中频频率 IF，中频功率由频谱分析仪测试得到。图中 TX 和 RX 模块上安装了片外介质天线，本实验中片上天线-片外介质天线链路增益约为 21 dB。

对于这个气体频谱分析传感器片外展示测试系统，只要在发射机 TX 模块和接收机 RX 模块的光学工作台之间，放置充有某种气体的气体吸收管，即可以搭建气体频谱分析传感器，根据 245 GHz 射频信号在包含特定气体成分的气体吸收管中的吸收频谱，就可以判断吸收管内该特定气体成分<sup>[15]</sup>。

发射机 TX 模块和接收机 RX 模块的压控振荡器由 2 个锁相环控制，在 TX 和 RX 相距 1.5 m 时，通过同时改变 TX 和 RX 中 2 个锁相环的参考信号，获得固定中频频率 IF 163 MHz。TX 频率从 236.4 GHz 变为 252 GHz，而 RX 的 LO 频率从 236.5 GHz 变为 252.1 GHz。图 7 显示了当 TX 和 RX 相距 1.5 m 时的中频频率 IF 的频谱。根据式(1)，可以计算接收机天线接收到的功率  $P_r$ 。

发射机芯片的输出功率为  $P_t=0$  dBm，接收机天线链路增益  $G_r=21$  dBi，发射机天线链路增益  $G_t=21$  dBi，则接收机接收到的射频功率  $P_r$  为  $-41.74$  dBm。接收机的转换增益可以通过从接收到的中频信号功率(dBm)中减去  $-41.74$  dBm 得到。测试结果见图 8。在压控振荡器整个频率调谐范围 236~252 GHz 内，转换增益波动在 3 dB 带宽之内。

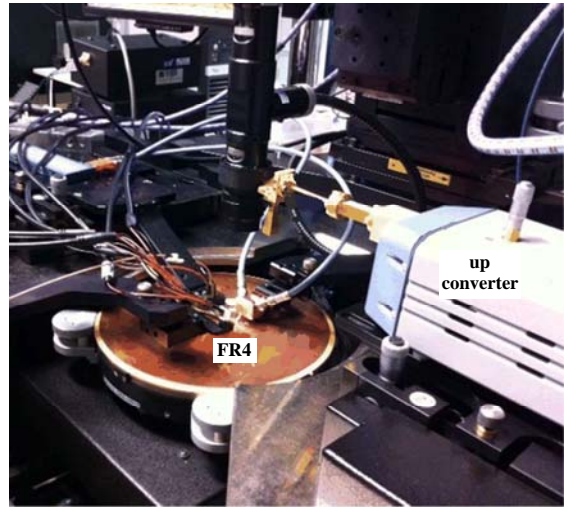


Fig.4 Photo of the off-chip measurement of subharmonic receiver  
图 4 245 GHz 次谐波接收机片外测试系统实物图

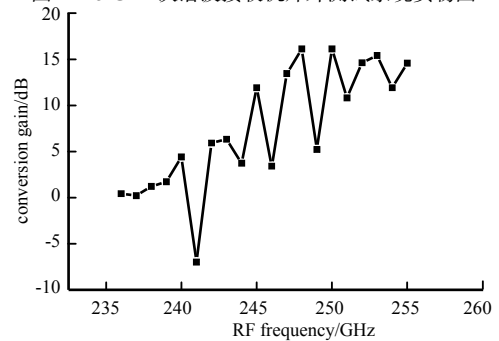


Fig.5 Calculated conversion gain of receiver in off-chip measurement  
图 5 接收机片外测试系统转换增益测试结果

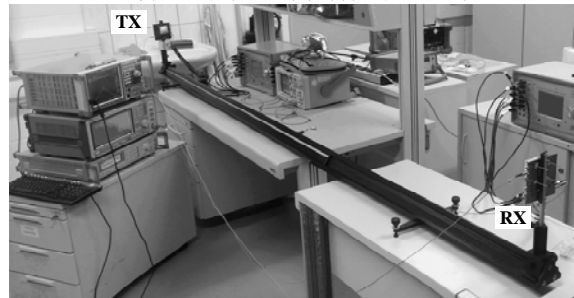


Fig.6 Photo of the off-chip demonstrator of subharmonic receiver for gas spectroscopy  
图 6 接收机气体频谱分析传感器片外展示测试系统实物图

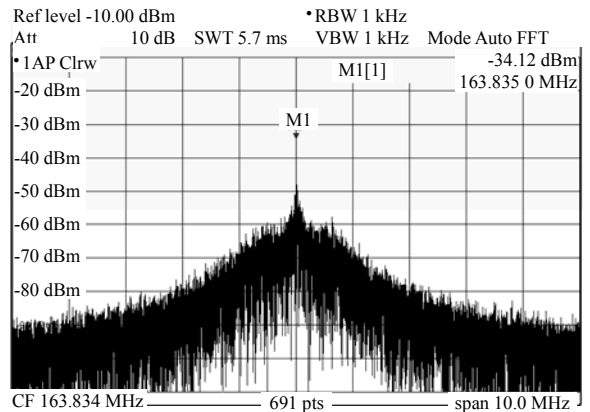


Fig.7 IF spectrum of the received signal: IF frequency in off-chip measurement demonstration at 163 MHz  
图 7 片外展示测试系统中接收到的 163 MHz 中频信号的频谱

### 3.3 片外测试系统与片外展示测试系统测试结果对比

将片外展示测试系统测得的转换增益(9 dB)与片外测试系统转换增益测量结果(15 dB)相比较,存在大约 5~6 dB 的差异,带宽大小大致相同,存在 8~9 GHz 的频率偏移。增益差异可能是由于片外测试系统与片外展示测试系统中多径损耗等传输效应不同等原因造成;频率偏移可能是由于片外展示系统额外采用了片外介质镜头造成。

将 2 次片外测试系统的测试结果(接收机转换增益为 15 dB 和 9 dB)与表 1 的次谐波接收机芯片的各个模块的片上测试结果(接收机转换增益为 15 dB)相比较,片外测试结果与片上测试结果也吻合。

### 3.4 研究现状对比

表 2 给出本文的接收机与当前研究现状的比较。本文中的接收机与参考文献[14-16]中的接收机相比较,获得了相当的转换增益等性能,但功率比文献[14-16]要低得多。与文献[16]中的接收机相比,本文中的接收机如果不包含本地振荡器,则功率为 107 mW,仅为文献[16]中接收机功率的一半。文献[14-15]中 2 个接收机都包括片上天线、本地振荡器和分频器等电路模块,虽然获得了相当的性能,但本文接收机的功率不到文献[14-15]接收机功率的一半。将本文与文献[17]中的接收机进行比较,文献[17]中采用跨阻型放大器 TIA 的接收机架构可获得较宽的带宽 55 GHz,但是本振信号是通过片外提供的。参考文献[18-19]中的接收机芯片利用 $\times 16$ 乘法器链路产生本振信号,而本文中的接收机包含 120 GHz 本振信号,大大降低了功耗,在功耗方面显示出很大的优势。总之,与研究现状相比,片外及片外展示测试系统测试结果表明,本文中接收机具有高增益、高带宽、集成本地振荡信号、低功耗的性能优势。

表 2 研究现状对比

Table 2 Comparison of the state of the art

RF frequency /GHz	technology $f_i/f_{max}$ /GHz	integration level	conversion gain /dB	power consumption /mW	noise figure /dB	bandwidth /GHz	1 dB compression point/dBm	
[14]	220	280/435	low noise amplifier, mixer	16.0	216.0	18.0	25	-
[15-16]	245	300/500	low noise amplifier, mixer, 120 GHz voltage-controlled oscillator, frequency divider, buffer for oscillator, on-chip antenna	18.0	712.3	18.0	-	-25
[17]	240	350/550	Balun, $\times 16$ frequency multiplier, mixer, power amplifier, buffer, on-chip antenna, quadrupler	7.8	915.8	11.3	47	-
[18]	240	350/550	Balun, $\times 16$ frequency multiplier, mixer, power amplifier, low noise amplifier, on-chip antenna	10.5	986.0	15.0	17	-18
[19]	240	300/500	Trans-impedance amplifier, multiplier (external oscillator)	13.0	500.0	18.0	55	-
this work	245	300/500	low noise amplifier, 120 GHz voltage-controlled oscillator, frequency divider, mixer, on-chip antenna	15.0	288.0/107.0 (with/without oscillator)	17.0	15	-24

### 3.5 245 GHz 太赫兹气体频谱分析传感器展望

在图 6 的片外展示测试系统的 245 GHz 发射机和接收机之间加入充有特定较低压强(如约 20 Pa)和一定温度(一般为常温)气体的气腔,即构成了太赫兹气体频谱分析传感器<sup>[6,14]</sup>。文献[6,14]中气腔体积较大,不适用于日常消费电子,因此今后还可以通过缩微气腔体积,结合文献[6,20]中的根据气体吸收频谱自动分析和判断气腔中气体成分的系统,并设计气腔的气压自动控制机电系统,实现小体积的适用于消费电子的智能气体频谱分析传感器。而本文的接收机由于具有高增益、高带宽、集成本地振荡信号的综合性能优势,同时又具有较低功耗,非常适用于消费电子领域的小体积的全自动智能气体频谱分析传感器。

## 4 结论

为了实现太赫兹气体频谱分析传感器,本文利用德国罗德与施瓦茨(R&S)矢量网络分析仪、频率扩展器、喇叭天线等等建立了 245 GHz 集成片上天线的次谐波接收机片外测试系统,得到了 15 dB 转换增益、15 GHz 带宽的接收机片外测试结果;然后,通过将 TX 模块和 RX 模块安装在可以移动的光学工作台上,建立了基于 245 GHz 接收机芯片及发射机芯片的气体频谱分析传感器片外展示测试系统,得到 9 dB 的转换增益和 16 GHz 带宽的接收机片外测试结果。最后,比较次谐波接收机芯片片外测试系统和次谐波接收机芯片的气体频谱分析传感器片外展示测试系统的测试结果,次谐波接收机芯片的片外测试系统和片外测试系统结果基本吻合。两次片外测试结果与

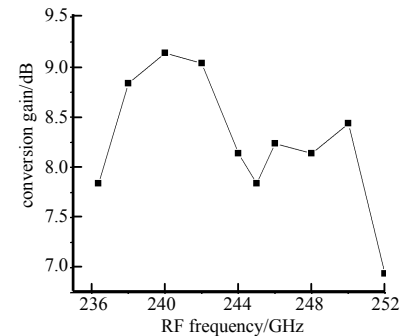


Fig.8 Calculated conversion gain of receiver in off-chip measurement demonstration

图 8 接收机片外展示测试系统转换增益测试结果

接收机芯片的片上测试结果也基本吻合。与研究现状相比,本文中的次谐波接收机具有高增益、高带宽但是低功耗的性能优势。在片外展示测试系统的 245 GHz 发射机和接收机之间加入充有特定气体的气腔,即构成了太赫兹气体频谱分析传感器。而本文的接收机由于具有高增益、高带宽、集成本地振荡信号的综合性能优势,同时又具有较低功耗,非常适用于消费电子领域的小体积的智能气体频谱分析传感器。

#### 参考文献:

- [1] JANUSZ G, BERND H, ULLRICH R P. Solid-state terahertz superresolution imaging device in 130-nm SiGe BiCMOS technology[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017,65(11):4357–4372.
- [2] AL-IBADI A, CASSAR Q, ZIMMER T, et al. THz spectroscopy and imaging for breast cancer detection in the 300–500 GHz range[C]// 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves(IRMMW–THz). Cancun, Mexico: [s.n.], 2017:1.
- [3] GRZYB J, STATNIKOV K, SARMAH N, et al. 3-D high-resolution imaging at 240 GHz with a single-chip FMCW monostatic radar in SiGe HBT technology[C]// 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW–THz). Copenhagen, Denmark: [s.n.], 2016:1–2.
- [4] WEIDE D W, MURAKOWSKI J, KEILMANN F. Gas-absorption spectroscopy with electronic terahertz techniques[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2000,48(4):740–743.
- [5] NICK R, KLAUS S, JOHANNES B, et al. Towards breath gas detection with a 245 GHz gas sensor based on SiGe BiCMOS technology[C]// *IEEE SENSORS*. Glasgow, UK: IEEE, 2017:1–3.
- [6] KLAUS S, JOHANNES B, PHILIPP N, et al. Gas spectroscopy system at 245 and 500 GHz using transmitters and receivers in SiGe BiCMOS[C]// 2016 Global Symposium on Millimeter Waves(GSMM) & ESA Workshop on Millimetre-Wave Technology and Applications. Espoo, Finland: [s.n.], 2016:1–4.
- [7] KATSUHIRO A, YUKO U. THz chemical imaging for biological applications[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2011,1(1):293–300.
- [8] KEMP M C. Explosives detection by terahertz spectroscopy—a bridge too far?[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology*, 2011,1(1):282–292.
- [9] HIROSHI H, TOSHIHIKO K, SONG H J, et al. 300-GHz band 20-Gbps ASK transmitter module based on InP–HEMT MMICs[C]// 2015 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium(CSICS). New Orleans, USA: IEEE, 2015:1–4.
- [10] TAKURO T, SONG H J, MAAKOTO Y. Compact THz LTCC receiver modules for 300 GHz wireless communications[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2016,26(4):291–293.
- [11] KOSUKE K, KYOYA T, SHUHEI A, et al. CMOS 300-GHz 64-QAM transmitter[C]// 2016 IEEE MTT–S International Microwave Symposium(IMS). San Francisco, USA: IEEE, 2016:1–4.
- [12] MAO Y, SCHMALZ K, BORNGRABER J, et al. 245 GHz subharmonic receiver in SiGe[C]// *IEEE MTT–S International Microwave Symposium Digest(MTT)*. Seattle, WA, USA: IEEE, 2013:1–4.
- [13] MAO Y, SCHMALZ K, BORNGRABER 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.
- [14] SCHMALZ K, BORNGRABER J, WANG R, et al. Subharmonic 245 GHz SiGe receiver with antenna[C]// *European Microwave Integrated Circuit Conference*. Nuremberg, Germany: IEEE, 2013:121–124.
- [15] SCHMALZ K, WANG R, MAO Y, et al. 245 GHz SiGe sensor system for gas spectroscopy[C]// *IEEE SENSORS*. Glasgow, UK: IEEE, 2017:1–3.
- [16] ÖJEFORS E, HEINEMANN B, PFEIFFER U R. A 220 GHz subharmonic receiver front end in a SiGe HBT technology[C]// *IEEE RFIC*. Baltimore, MD, USA: IEEE, 2011:1–4.
- [17] EISSAA M H, AWNY 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.
- [18] VAZQUEZ P R, GRZYB J, SARMAH N, et al. A 219–266 GHz fully-integrated direct conversion IQ receiver module in a SiGe HBT technology[C]// *IEEE EUMA*. Nuremberg, Germany: IEEE, 2017:261–264.
- [19] SARMAH N, GRZYB J, STATNIKOV K, et al. A fully integrated 240 GHz direct conversion quadrature transmitter and receiver chipset in SiGe technology[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2016,64(2):562–574.
- [20] NICK R, SCHMALZ K, BORNGRABER J, et al. Towards breath gas detection with a 245 GHz gas sensor based on SiGe BiCMOS technology[C]// *IEEE Microwave Component and Wireless Components Letters*, 2017,27(7):675–677.