

高端口隔离度的太赫兹基波上混频器设计

孟凡易,刘浩[†]

(天津大学微电子学院,天津 300072)

摘要:介绍了一种基于 IHP 0.13 μm SiGe BiCMOS 工艺,具有高本振(Local Oscillator, LO)/射频(Radio Frequency, RF)及本振/中频(Intermediate Frequency, IF)端口隔离度的太赫兹基波上混频器.该混频器采用了吉尔伯特双平衡结构,本振信号通过共面波导(Coplanar Waveguide, CPW)传输来抑制其在传输过程中由于强寄生耦合效应造成的传输不对称性,削弱了由该不对称性造成的 LO/RF 端口隔离度恶化的特性.通过采用非对称性的开关互联结构降低本振信号在开关晶体管集电极端寄生耦合的不平衡性,提升本振信号在开关晶体管集电极端的对消效率,通过在版图中合理布局跨导级晶体管的位置来抑制本振信号在中频端口的泄露.后仿真结果表明:在 2.2 V 电源电压下,本振信号为 230 GHz,中频信号为 2~12 GHz,该上混频器工作在 218~228 GHz 时,LO/RF 端口隔离度大于 24 dB, LO/IF 端口隔离度大于 20 dB,转换增益为 -4~-3.5 dB.当中频信号为 10 GHz 时,输出 1 dB 压缩点为 -14.8 dBm.电路直流功耗为 42.4 mW,芯片的核心面积为 0.079 mm^2 .该上混频器可应用于采用高阶正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)方式的无线发射系统.

关键词:太赫兹;吉尔伯特双平衡;共面波导;非对称开关互联

中图分类号:TN773.1

文献标志码:A

Design of Terahertz Fundamental Up-conversion Mixer with Good Port-to-port Isolation

MENG Fanyi, LIU Hao[†]

(School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A terahertz fundamental up-conversion mixer with a high Local Oscillator (LO)/Radio Frequency (RF) and local oscillator /Intermediate Frequency (IF) port isolation was presented based on IHP 0.13 μm SiGe BiCMOS process. The mixer adopted Gilbert's double-balanced structure, and the local oscillator signal was transmitted through the Coplanar Waveguide (CPW) to suppress the transmission asymmetry caused by the strong parasitic coupling effect in the transmission process, reducing the characteristic of LO/RF port isolation deterioration caused by the asymmetry. By adopting an asymmetric switch interconnection structure, the imbalance of the parasitic coupling of the local oscillator signal at the collectors of the switching transistors was reduced, and the cancellation efficiency of the local oscillator signal at the collectors of the switching transistors was improved. The leakage of the local oscil-

* 收稿日期:2021-11-29

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2019YFB1803200), National Key Research and Development Program of China (2019YFB1803200);国家自然科学基金青年基金资助项目(61701080), National Natural Science Foundation of China Youth Fund (61701080)

作者简介:孟凡易(1987—),男,江苏连云港人,天津大学教授

[†]通信联系人, E-mail: liuhao_3957@163.com

lator signal was suppressed at the port of intermediate frequency by arranging the position of the transconductance transistors in a reasonable layout. The post-simulation results show that, under the power supply voltage of 2.2 V, the local oscillator signal is 230 GHz, and the intermediate frequency signal is 2–12 GHz. When the up-conversion mixer works at 218–228 GHz, the LO/RF port isolation is greater than 24 dB, LO/IF port isolation is greater than 20 dB, and the conversion gain is -4 dB to -3.5 dB. The output 1 dB compression point is -14.8 dBm when the intermediate frequency signal is 10 GHz. The DC power consumption is 42.4 mW, and the core area of the chip is 0.079 mm². The up-conversion mixer can be applied to a wireless transmission system using a high-order quadrature amplitude modulation method.

Key words: terahertz; Gilbert double-balanced; coplanar waveguide; asymmetrical switch interconnection

太赫兹波带宽宽、窄波束的优点使其能实现高速、高保密度的无线通信^[1-7],当太赫兹波在太空中传输时,比地面低的传输损耗更是增加了其传播距离.因此太赫兹波在构建空间高速无线网络方面有着巨大的潜力,对太赫兹无线收发系统中电路模块的研究具有重要意义.

集成式太赫兹上混频器作为微型化太赫兹无线发射系统中的重要模块^[8-9],实现了将中频信号搬到太赫兹载波上的功能,其端口隔离度和转换增益决定着系统性能的高低.例如,低的 LO/RF 端口隔离度会使后级功率放大器出现阻塞现象^[10],降低发射系统的通信速率.对有源上混频结构,低的 LO/IF 端口隔离度会使较高功率的本振信号进入跨导级,压缩跨导级的输入,降低跨导级的输入线性度,进而降低高阶 QAM 调制方式下的通信质量.低的转换增益则会降低整个发射系统的增益.然而在太赫兹频段,强的电磁耦合降低了其端口隔离度,明显的趋肤效应^[11]、高的开关晶体管损耗降低了其转换增益.针对上述设计难点,近年来国内外研究者们主要在提升 LO/RF 端口隔离度和转换增益方面做了许多研究,提出的代表性结构有:(1)平方律上混频结构^[12],该结构工作在强非线性区,输出本振信号分量较低,同时在输出端采用 Rat-race balun 进一步消除了本振信号分量,提升了 LO/RF 端口隔离度,但该结构转换增益较低.(2)改进型吉尔伯特双平衡上混频结构^[13-15](本振信号控制跨导级,中频信号控制开关级),具有一定的转换增益,同时用本振信号控制跨导级,中频信号控制开关级提升了 LO/RF 端口隔离度,但中频信号控制开关级,损失了中频信号的幅度信息,使其不能应用于采用高阶 QAM 调制方式的无线发射系统,难以实现高的通信速率.根据 IEEE 802.15.3d 标准可知,具有高阶 QAM 调制性能的单芯片收发系统是未来的发展趋势.

针对上述问题,本文设计了一款基于 IHP 0.13 μm SiGe BiCMOS 工艺,具有高 LO/RF、LO/IF 端口隔离度的太赫兹基波上混频器,其具有一定的转换增益且能够应用于采用高阶 QAM 调制方式的无线发射系统.该上混频器具体为以吉尔伯特双平衡上混频结构为基础,通过对本振信号采用共面波导传输的形式,对开关晶体管采用非对称性的互联结构,提升了 LO/RF 端口隔离度;通过跨导级晶体管的“屏蔽”作用提升了 LO/IF 端口隔离度,而该结构本身具有一定的转换增益,且本振、中频信号分别从开关级、跨导级馈入的方式,使其能够应用于采用高阶 QAM 调制方式的无线发射系统,有利于实现更高的通信速率.后仿真验证了该上混频结构的可行性.

1 电路分析与技术

1.1 吉尔伯特双平衡上混频结构

吉尔伯特双平衡上混频结构由于在每一个射频端口都能够进行本振泄露对消、提供一定的转换增益,且适用于采用高阶 QAM 调制方式的无线发射系统而被广泛应用.本次上混频器设计中主体采用了该结构,其原理简图如图 1 所示.

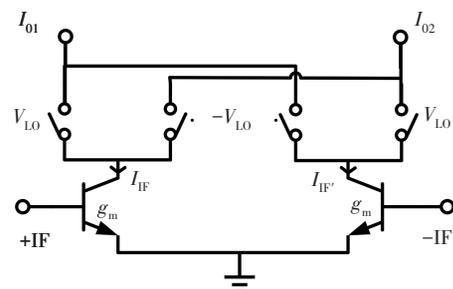


图 1 吉尔伯特双平衡上混频器简图

Fig.1 Schematic diagram of Gilbert's double-balanced up-conversion mixer

设中频输入电压为 $V_{IF}\cos\omega_{IF}t$, 两个跨导级晶体管的跨导均为 g_m , 为便于分析, 将开关级用幅度为 1、频率为 ω_{LO} 的方波信号描述, 结合图 1, 可以得到该上混频器的射频输出信号为:

$$\begin{aligned} I_{O1} - I_{O2} &= (I_{IF}(t) - I_{IF}(t)) \times \text{sgn}[\cos\omega_{LO}t] \\ &= g_m V_{IF} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(n\pi/2)}{n\pi/2} \times \\ &[\cos(n\omega_{LO} + \omega_{IF})t + \cos(n\omega_{LO} - \omega_{IF})t] \\ &= g_m V_{IF} \frac{2}{\pi} \times [\cos(\omega_{LO} + \omega_{IF})t + \\ &\cos(\omega_{LO} - \omega_{IF})t - \frac{1}{3}\cos(3\omega_{LO} + \omega_{IF})t - \\ &\frac{1}{3}\cos(3\omega_{LO} - \omega_{IF})t + \dots] \end{aligned} \quad (1)$$

相应的输出频谱如图 2 所示.

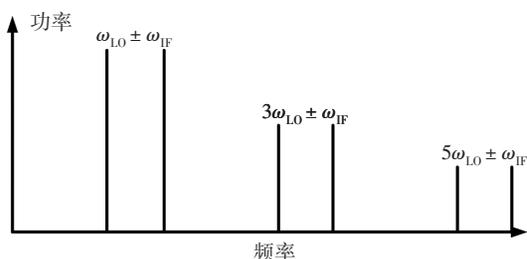


图 2 吉尔伯特双平衡上混频器的输出频谱

Fig.2 Output spectrum of Gilbert double-balanced up-conversion mixer

通过上述分析可以看到, 在理想情况下, 吉尔伯特双平衡上混频器射频端口没有本振分量, 同时由式(1)可知, 跨导级的存在使该结构能够提供一定的转换增益, 因此跨导级对电路的输出功率、线性度也有着决定性的影响. 在本次上混频器的设计中, 通过选择合适的跨导级晶体管尺寸、偏置电压, 在满足所需输出功率与线性度的情况下实现了一定的转换增益. 需仔细选取开关级晶体管的尺寸、偏置电压, 以实现优良的开关特性并保证电路正常工作, 其中小的晶体管尺寸能减小晶体管的寄生电容, 增强其开关特性^[16]. 开关级晶体管的偏置电压则需确保其实现优良开关特性的同时保证跨导级晶体管工作在线性放大状态. 表 1 给出了根据上述原则得到的晶体管尺寸和偏置电压, 其中电源电压为 2.2 V. 在本振、射频端口均采用匹配电路来减少本振和射频信号的反射, 对于中频端口, 基于芯片面积的考虑, 未进行匹配设计.

图 3 为本文设计的上混频器原理图(图中略去了基极偏置). 然而在实现过程中, 元件之间的耦合

效应、版图绘制中的交叉走线以及版图的不匹配均会使射频端口的本振泄露对消不彻底, 尤其当电路工作在太赫兹频段时, 本振信号线与开关晶体管间明显的寄生效应、由本振信号在开关晶体管集电极端寄生耦合的不平衡而导致的本振信号在开关晶体管集电极端对消效率的下降, 均使 LO/RF 端口隔离度显著恶化. 而且本振与中频信号线间明显的寄生效应也增大了本振信号耦合到中频输入端的分量, 降低了 LO/IF 端口隔离度. 因此在电路具体实现中提升 LO/RF、LO/IF 端口隔离度显得尤为重要. 为此本文提出了如下的 LO/RF、LO/IF 端口隔离度提升技术.

表 1 该上混频器的晶体管尺寸和偏置电压

Table 1 Transistor sizes and bias voltages of the up-conversion mixer

	晶体管尺寸(发射极面积)	偏置电压
跨导级	8×70 nm×900 nm	1.1 V
开关级	4×70 nm×900 nm	2.3 V

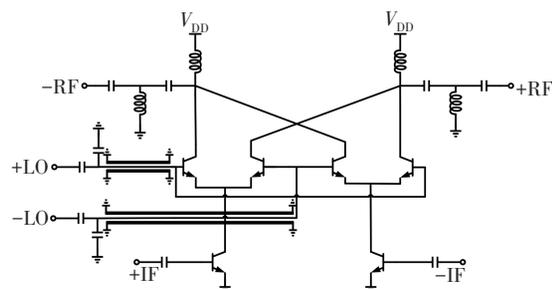


图 3 上混频器原理图

Fig.3 Schematic diagram of the up-conversion mixer

1.2 LO/RF 端口隔离度提升技术

1.2.1 共面波导本振传输方式

由于该上混频器最终要接入发射链路, 本振信号传输布局方式如图 4 所示, 考虑太赫兹频段明显的趋肤效应使得信号在传输过程中具有高的损耗. 因此为降低本振链路的设计压力和本振输入功率, 本振信号线 L 不宜过长. 当 L 过小时, 寄生电容 C_p 变大, 本振信号将通过寄生电容 C_p 耦合一部分到晶体管, 下面以晶体管 1 为例进行说明, 记该部分在晶体管 1 集电极端的泄露为:

$$\beta \times V_{LO} \quad (2)$$

式(2)中 V_{LO} 为输入本振信号, β 为对应的系数. 记非 C_p 耦合的、输入到开关晶体管 1 的本振信号在其集电极端的泄露为:

$$\alpha \times V_{LO} \quad (3)$$

式(3)中, α 为对应的系数. 因此晶体管 1 泄露到其集电极端的本振信号为:

$$(\alpha + \beta) \times V_{LO} \quad (4)$$

而与其进行本振对消的晶体管 3 不存在寄生电容 C_p 耦合本振信号, 在不考虑开关互联的情况下, 结合电路结构和上述讨论, 泄露到晶体管 3 集电极端的本振信号为:

$$-\alpha \times V_{LO} \quad (5)$$

根据式(4)和式(5)可知本振对消结果将不为 0. 因此对本振信号采用共面波导传输将使得寄生电容 C_p 减小, 并减少了本振信号直接通过寄生电容 C_p 耦合到开关晶体管的分量.

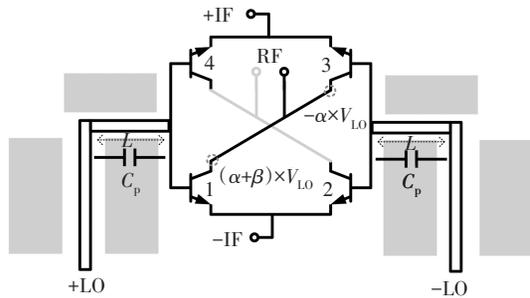
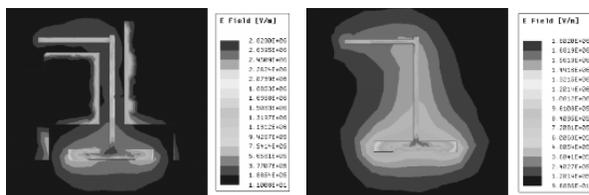


图4 混频器本振信号 CPW 传输结构

Fig.4 Local oscillator signal CPW transmission structure of the mixer

图 5 展示了本振信号采用共面波导与不采用共面波导传输时的电场分布图, 从图中的电场分布可以看到, 共面波导传输使得开关晶体管与本振信号线间的电场耦合明显减小.



(a) 共面波导传输

(b) 非共面波导传输

图5 两种本振传输结构下本振传输电场分布图

Fig.5 Electric field distribution diagrams of local oscillator transmission under two structures of local oscillator transmission

图 6 展示了图 5(a)(b) 两种传输结构下, 本振信号在射频端口的泄露, 其中本振信号频率为 230 GHz, 从仿真结果可以看出本振信号采用共面波导传输将 LO/RF 端口隔离度提升了 4 dB.

1.2.2 非对称开关互联结构

由于开关互联存在交叉(为降低信号损耗, 本次设计中该结构使用最厚的两层金属 TM1、TM2

现), 同时为进一步降低信号的传输损耗, 该互联线较短, 因此在工作频段开关互联线间的耦合将非常明显. 如图 7(a) 所示, 如果开关晶体管直接对称相连, 晶体管 2 的本振泄露信号中的一部分将通过寄生电容 C_1 由顶层(TM2)信号线耦合到次顶层(TM1)信号线, 而对于晶体管 1, 不存在如寄生电容 C_1 的耦合, 因此晶体管 1 与晶体管 2 的本振泄露对消将不完全. 可以采用如图 7(b) 所示的非对称开关互联结构, 其中增大晶体管 1 集电极端的引出面积 S , 使一部分本振泄露信号通过对地的寄生电容 C_2 耦合到地, 提高了与晶体管 2 的本振对消效率. 对另外一对进行本振对消的开关晶体管采取同样的设计.

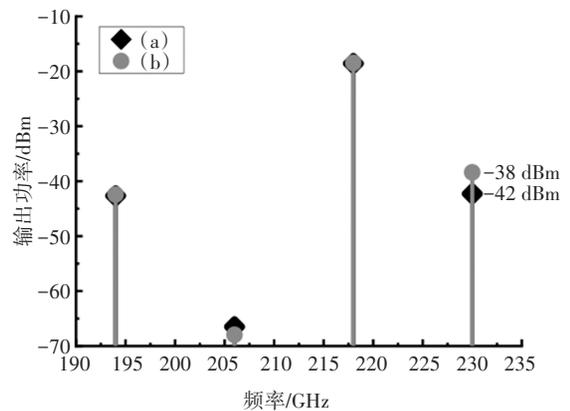
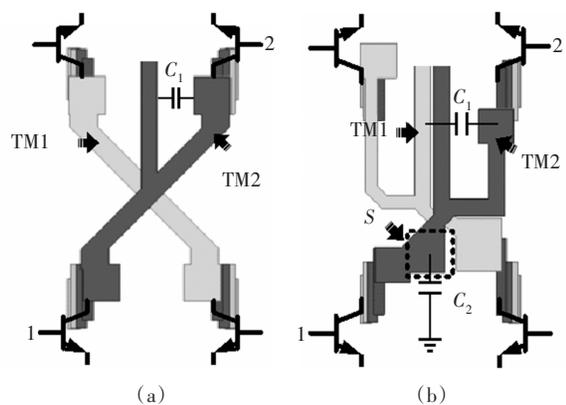


图6 图5(a)和(b)两种本振传输结构下本振信号在射频端口的泄露

Fig.6 Leakage of local oscillator signal at RF port under two local oscillator transmission structures of Fig.5(a) and Fig.5(b)



(a)

(b)

图7 两种开关互联结构

Fig.7 Two switch interconnection structures

图 8 展示了图 7 两种开关互联结构下本振信号在射频端口的泄露, 其中本振频率为 230 GHz, 对于非对称的开关互联结构[图 7(b)], 其 LO/RF 端口隔离度比结构图 7(a) 的高 14.1 dB.

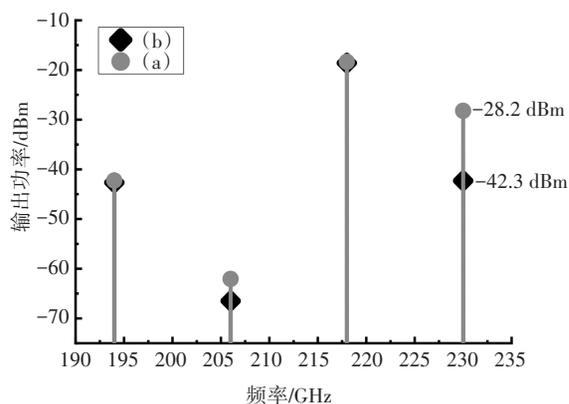


图 8 两种开关互联结构下本振信号在射频端口的泄露
Fig.8 Leakage of local oscillator signal at RF port under two switch interconnection structures

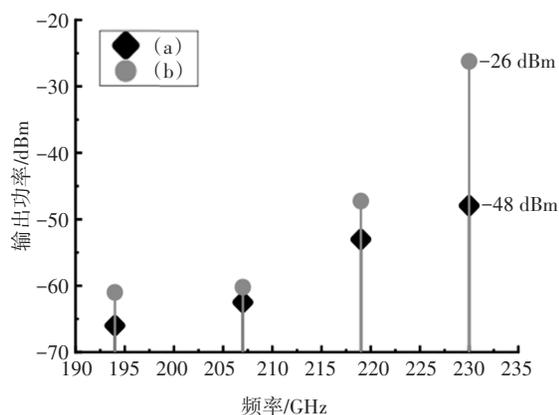


图 11 两种跨导级晶体管布局下本振信号在中频端口的泄露
Fig.11 Leakage of local oscillator signal at IF port under two transconductance transistor layouts

1.3 LO/IF 端口隔离度提升技术

在整个上混频器的版图布局中,中频信号线与本振信号线有交叠,如图 9 所示,由于本振信号频率、功率均高,因此可以直接通过寄生电容耦合到中频信号线.为提高 LO/IF 端口隔离度,可使本振信号线与跨导级晶体管的中频输出端相交,即用跨导级晶体管“屏蔽”本振信号,防止其泄露到中频输入端,如图 10(a)所示.图 10(b)为本振信号线直接与跨导级晶体管中频输入端进行相交的布局.

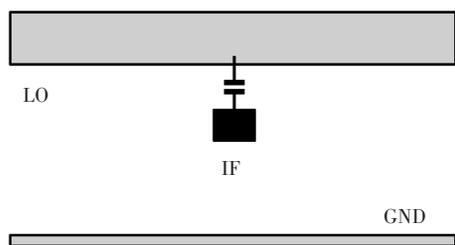


图 9 LO 传输与 IF 传输之间的耦合
Fig.9 Coupling between LO transmission and IF transmission

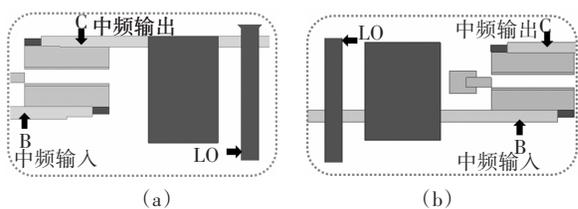


图 10 跨导级晶体的两种布局
Fig.10 Two layouts of transconductance transistor

图 11 展示了图 10 两种跨导级晶体管布局下本振信号在中频端口的泄露.图 10(a)布局明显减少了本振信号在中频端口的泄露,使得 LO/IF 端口隔离度能大于 20 dB.

2 版图设计与结果分析

采用 IHP 0.13 μm SiGe BiCMOS 工艺设计并绘制了该太赫兹基波上混频器的版图,核心部分如图 12 所示.其中版图绘制遵循以下原则.

- 1) 信号传输线的拐角为 45° 或 135° ,以降低拐角处的寄生电容;
- 2) 为降低电感的寄生电容,保证匹配带宽,在满足电流承载能力的情况下尽量减小线宽;
- 3) 对开关晶体管的基极而言,从底层薄金属引到高层厚金属信号线时,通孔应尽可能多,以此减小通孔寄生电阻对本振信号的衰减.

该上混频器版图的核心面积为 0.079 mm^2 .其中对该上混频器无源器件整体采用三维电磁仿真软件 HFSS 进行寄生提取.

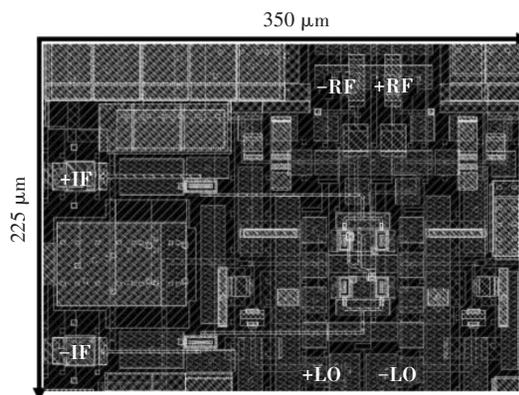


图 12 太赫兹基波上混频器核心版图
Fig.12 Core layout of terahertz fundamental up-conversion mixer

由于该上混频器最终应用于采用高阶 QAM 调

制方式的太赫兹无线发射系统,为保证信号质量,输出须有一定的功率回退,相应的输入功率也须有一定的回退.在整个后仿过程中,输入中频功率为 -15 dBm,其中中频信号频率范围为 $2 \sim 12$ GHz,本振信号频率为 230 GHz,功率 3 dBm.

图 13 为该太赫兹基波上混频器在 typ 工艺角下,射频输出在 $218 \sim 228$ GHz(基于信号损耗的考虑,选取了下边带)时的 LO/RF 端口隔离度.可以看到,在 $218 \sim 228$ GHz 范围内,射频输出功率与本振泄露功率相差大于 24 dB,该混频器具有优良的 LO/RF 端口隔离度.

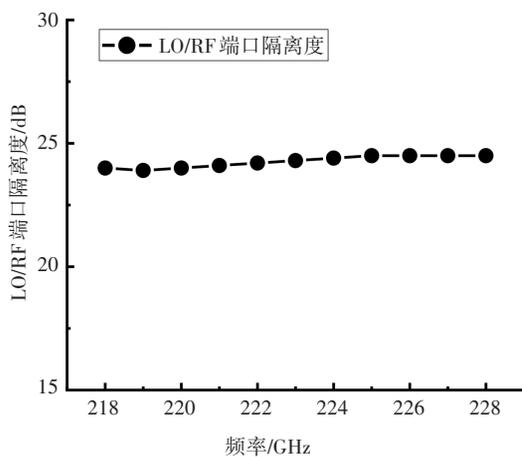


图 13 射频输出在 $218 \sim 228$ GHz 时的 LO/RF 端口隔离度

Fig.13 Port isolation of LO/RF when the RF output is $218 \sim 228$ GHz

图 14 展示了该太赫兹基波上混频器的本振、射频端口反射系数和转换增益.在 $228 \sim 232$ GHz、 $218 \sim 228$ GHz 的范围内,本振、射频端口的反射系数分别小于 -13 dB、 -11 dB,实现了优良的端口匹配.在 $218 \sim 228$ GHz 范围内转换增益为 $-4 \sim -3.5$ dB,具有较高的转换增益和优良的增益平坦度.其中优良的增益平坦度得益于以下两点.

1) 优良的射频端口匹配.

2) 跨导级平坦的增益响应.其中对跨导级的输入(中频)端口尽管未做匹配,但通过分析其输入阻抗发现,在中频信号的较低频段,输入阻抗的实、虚部与 50Ω 相差较大,失配程度高,随着频率的升高,输入阻抗的实、虚部绝对值减小,失配程度减小.

同时在整个中频信号频段内,跨导级晶体管的最大可用增益 G_{\max} 随频率递减,因此尽管没有对跨导级输入端口进行匹配,在整个中频信号频带内跨导级也能实现平坦的增益响应.

图 15 展示了该太赫兹基波上混频器在中频为

10 GHz 时的大信号特性,其输出 1 dB 压缩点为 -14.8 dBm,而难以实现高输出功率的原因是太赫兹频段高的开关和信号传输损耗.

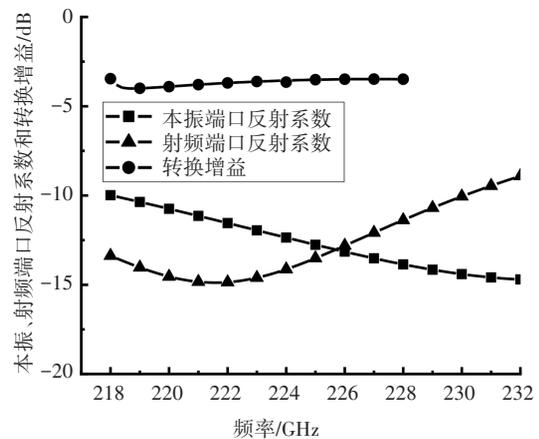


图 14 该混频器的本振、射频端口反射系数和转换增益

Fig.14 Reflection coefficient of LO、RF port and conversion gain of the mixer

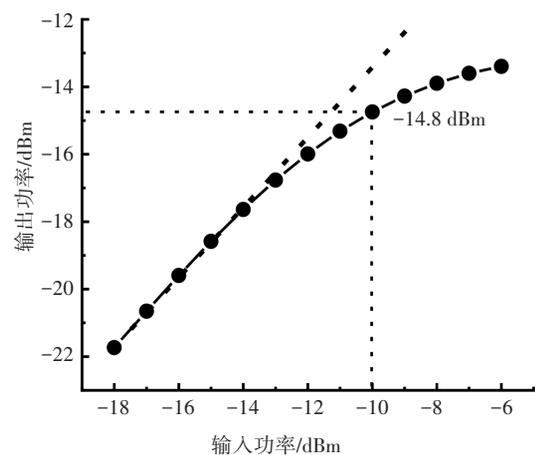


图 15 该混频器在中频为 10 GHz 时的大信号特性

Fig.15 Large signal characteristics of the mixer at an IF of 10 GHz

表 2 给出了本设计中的太赫兹基波上混频器性能参数与近年来相关工作的对比.由表 2 可知,本文设计的太赫兹基波上混频器在实现优良端口隔离度的同时具有一定的转换增益,且能够应用于采用高阶 QAM 调制方式的无线发射系统,有利于实现更高的通信速率.而该上混频器直流功耗较高的原因是,为了实现一定的输出功率,同时考虑工作频段高的开关和信号传输损耗,选用了较大尺寸的跨导级晶体管.因此未来可进一步探明开关晶体管的寄生效应,进一步降低开关过程中的损耗,从而减小跨导级晶体管的尺寸,降低直流功耗.

表 2 相近频带的上混频器性能对比

Tab.2 Performance comparison of up-conversion mixers in similar frequency bands

文献	工艺	中心频率/ GHz	LO/RF_隔 离度/dB	LO/IF_隔离 度/dB	转换增益/dB	输出 1dB 压缩点/dBm	直流功 耗/mW	QAM发射 系统可用否
*[16]	0.13 μm SiGe	240	—	—	11(IF:25 MHz)	—	33	能
[15]	0.13 μm SiGe	190	35	—	-6(IF:2.5 GHz)	—	11.5	否
[14]	0.13 μm SiGe	150	*45	—	-7.5	—	10	否
*[13]	0.13 μm SiGe	240	34	—	-2(IF: 5 GHz)	—	—	否
*本文	0.13 μm SiGe	230	24	>20	-3.5(IF:12 GHz)	-14.8	42.4	能

注:*表示后仿真结果.

3 结论

本文介绍了一款基于 IHP 0.13 μm SiGe BiCMOS 工艺,具有高端口隔离度的太赫兹基波上混频器,具有一定的转换增益且能够应用于采用高阶 QAM 调制方式的无线发射系统,有利于实现更高的通信速率.后仿真验证表明,在 218 ~ 228 GHz 的范围内,该上混频器的 LO/RF 端口隔离度大于 24 dB, LO/IF 端口隔离度大于 20 dB,转换增益为 -4 ~ -3.5 dB. 该上混频器为未来空间建立高速无线通信网络做了相应的技术积累.

参考文献

- [1] KOENIG S, LOPEZ-DIAZ D, ANTES J, *et al.* Wireless sub-THz communication system with high data rate[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(12): 977-981.
- [2] 傅海鹏, 孙辉. 高功率太赫兹基波压控振荡器设计[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2021, 48(10): 145-151.
FU H P, SUN H. Design of terahertz fundamental wave voltage-controlled oscillator with high output power[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2021, 48(10): 145-151. (In Chinese)
- [3] DEFERN N, REYNAERT P. A 120 GHz fully integrated 10 gb/s short-range star-QAM wireless transmitter with on-chip bond wire antenna in 45 nm low power CMOS [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2014, 49(7): 1606-1616.
- [4] YU J Y, CHEN J X, ZHOU P G, *et al.* A 300-GHz transmitter front end with -4.1-dBm peak output power for sub-THz communication using 130-nm SiGe BiCMOS technology [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2021, 69(11): 4925-4936.
- [5] MOHAMMADNEZHAD H, WANG H, CATHELIN A, *et al.* A 115 - 135-GHz 8PSK receiver using multi-phase RF-correlation-based direct-demodulation method [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2019, 54(9): 2435-2448.
- [6] SONG H J, KIM J Y, AJITO K, *et al.* 50-gb/s direct conversion QPSK modulator and demodulator MMICs for terahertz communications at 300 GHz [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2014, 62(3): 600-609.
- [7] ELKHOULY M, MAO Y, MELIANI C, *et al.* A 245 GHz ASK modulator and demodulator with 40 Gbits/sec data rate in 0.13 μm SiGe BiCMOS technology [C]//2013 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Seattle, WA, USA: IEEE, 2013: 1-3.
- [8] YE Z Z, YANG F. A D-band I/Q drain mixer for direct up-conversion in 70-nm GaAs technology [C]//2021 IEEE MTT-S International Wireless Symposium. Nanjing, China: IEEE, 2021: 1-3.
- [9] LEE C J, KANG J S, PARK C S. A $\text{D}\text{-band}$ low-power gain-boosted up-conversion mixer with low LO power in 40-nm CMOS technology [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2017, 27(12): 1113-1115.
- [10] 池保勇, 余志平, 石秉学. CMOS 射频集成电路分析与设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 219.
CHI B Y, YU Z P, SHI B X. Analysis and design of CMOS RF integrated circuits [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 219. (In Chinese)
- [11] BAMERI H, MOMENI O. A high-gain mm-wave amplifier design: an analytical approach to power gain boosting [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2017, 52(2): 357-370.
- [12] KATAYAMA K, TAKANO K, AMAKAWA S, *et al.* 20.1 A 300GHz 40nm CMOS transmitter with 32-QAM 17.5Gb/s/ch capability over 6 channels [C]//2016 IEEE International Solid-State Circuits Conference. San Francisco, CA, USA: IEEE, 2016: 342-343.
- [13] EISSA M H, MALIGNAGGI A, WANG R Y, *et al.* Wideband 240-GHz transmitter and receiver in BiCMOS technology with 25-gbit/s data rate [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2018, 53(9): 2532-2542.
- [14] ZHOU P G, CHEN J X, YAN P P, *et al.* A 150-GHz transmitter with 12-dBm peak output power using 130-nm SiGe: C BiCMOS process [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2020, 68(7): 3056-3067.
- [15] FRITSCHKE D, STÄRKE P, CARTA C, *et al.* A low-power SiGe BiCMOS 190-GHz transceiver chipset with demonstrated data rates up to 50 gbit/s using on-chip antennas [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, 65(9): 3312-3323.
- [16] 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.