

文章编号: 1672-8785(2019)08-0024-06

## 220 GHz 低噪声放大器研究

毛燕飞<sup>1,2</sup> 鄂世举<sup>1\*</sup> SCHMALZ Klaus<sup>3</sup> SCHEYTT John Christoph<sup>4</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. 德国莱布尼兹高性能创新微电子研究所, 法兰克福 15236;
4. 帕德博恩大学海恩茨-尼克斯多夫研究所, 帕德博恩 33102)

**摘 要:** 基于 IHP 锗硅 BiCMOS 工艺, 研究和实现了两种 220 GHz 低噪声放大器电路, 并将其应用于 220 GHz 太赫兹无线高速通信收发机电路。一种是 220 GHz 四级单端共基极低噪声放大电路, 每级电路采用了共基极(Common Base, CB)电路结构, 利用传输线和金属-绝缘体-金属(Metal-Insulator-Metal, MIM)电容等无源电路元器件构成输入、输出和级间匹配网络。该低噪放电源的电压为 1.8 V, 功耗为 25 mW, 在 220 GHz 频点处实现了 16 dB 的增益, 3 dB 带宽达到了 27 GHz。另一种是 220 GHz 四级共射共基差分低噪声放大电路, 每级都采用共射共基的电路结构, 放大器利用微带传输线和 MIM 电容构成每级的负载、Marchand-Balun、输入、输出和级间匹配网络等。该低噪放电源的电压为 3 V, 功耗为 234 mW, 在 224 GHz 频点实现了 22 dB 的增益, 3 dB 带宽超过 6 GHz。这两个低噪声放大器可应用于 220 GHz 太赫兹无线高速通信收发机电路。

**关键词:** 低噪声放大器; 220 GHz; 共基级; 共射共基; 太赫兹无线高速通信收发机; BiCMOS 工艺

**中图分类号:** TN433 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.08.004

## Research on 220 GHz Low Noise Amplifiers

MAO Yan-fei<sup>1,2</sup>, E Shi-ju<sup>1\*</sup>, SCHMALZ Klaus<sup>3</sup>, SCHEYTT John Christoph<sup>4</sup>

- (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, Paderborn 33102, Germany)

**Abstract:** Based on the IHP SiGe BiCMOS technology, two 220 GHz low noise amplifier circuits are re-

**收稿日期:** 2019-07-06

**基金项目:** 浙江省自然科学基金(LQ17F0400); 东南大学毫米波国家重点实验室开放项目(K201817)

**作者简介:** 毛燕飞(1983-), 女, 浙江义乌人, 博士, 讲师, 主要从事射频、微波及太赫兹收发芯片及天线方面的研究。

\***通讯作者:** 鄂世举(1970-), 男, 吉林长春人, 博士, 博导, 主要从事新型功能材料应用技术及机电装备技术研究。E-mail: eshiju@163.com

searched, implemented and applied to 220 GHz terahertz wireless high-speed communication transceiver circuits. One is a 220 GHz four-stage single-ended common-base low-noise amplifier circuit. Each stage of the circuit adopts a common base circuit structure, and uses passive circuit components such as transmission lines and metal-insulator-metal (MIM) capacitors to form input, output and interstage matching network. The low noise amplifier has a supply voltage of 1.8 V, consumes 25 mW, achieves 16 dB of gain at 220 GHz, and reaches 27 GHz with a 3 dB bandwidth. The other is a 220 GHz four-stage cascode differential low-noise amplifier circuit. Each stage uses a cascode circuit structure. The amplifier uses microstrip transmission lines and MIM capacitors to form inductive load, Marchand-Balun, input, output and inter-stage matching networks. The low noise amplifier has a supply voltage of 3 V, consumes 234 mW, achieves 22 dB gain at 224 GHz, and exceeds 6 GHz with 3 dB bandwidth. These two low noise amplifiers can be used in 220 GHz wireless high speed terahertz communication transceiver circuits.

**Key words:** LNA; 220 GHz; common base; cascode; high speed THz communication transceiver; BiCMOS technology

## 0 引言

太赫兹技术可以应用于太赫兹通信, 适用于近距离高速传输、无线个人局域网通讯等。其内在的宽频特性使太赫兹波段即使在简单调制方式下也可以获得高传输速率。目前已有在 220 GHz、240 GHz 频段及 300 GHz 频段使用 ASK、QPSK、QAM 等调制方式的高速传输接收发射机<sup>[1-9]</sup>。220 GHz 接收机可以应用于太赫兹高速无线通信系统。一个典型应用为用于手持移动终端与静止非移动固定售货设备(KIOSK)之间的通信<sup>[9]</sup>, 高清电影、音乐、数字杂志等数字信息可以通过 KIOSK 利用近距离太赫兹通信系统高速传输到手持智能终端。220 GHz 接收机也可以广泛应用于移动终端之间近距离、即时高速通信, 如两个手机或者平板电脑之间的高速即时通信。

本文研究的两种 220 GHz 低噪声放大器

是应用于移动终端与静止非移动固定设备之间太赫兹高速通信的 220 GHz 接收机, 或者移动终端之间太赫兹高速通信的 220 GHz 接收机。

目前文献报道了各种 100 GHz 以上的低噪声放大器, 它们具有不同的拓扑结构, 如共发射极低噪放、共射共基低噪放、共基极低噪放等。文献[10]给出了 220 GHz 三级级联差分共射共基低噪声放大器, 它的增益为 15 dB, 带宽为 28 GHz。在文献[11]和[13]中, 利用共基极的感性正反馈网络提高增益, 给出了一种 230 GHz 五级差分共基极低噪声放大器(增益为 10 dB)和一种 233 GHz 四级差分共基极低噪声放大器(增益为 22.5 dB)。这两种低噪声放大器由于利用正反馈而获得高增益, 并且功率较低, 但是稳定性略差。在文献[12]中, 提出了一种 245 GHz、增益为 18 dB 的利用电感耦合的五级共射共基差分低噪放。

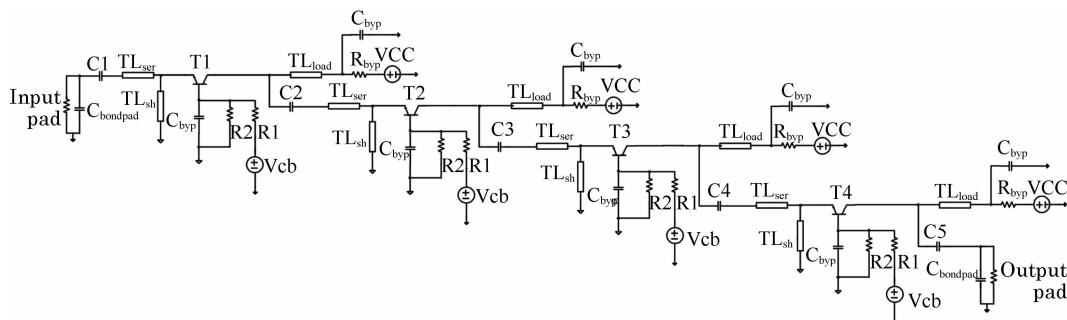


图 1 220 GHz 四级共基极低噪声放大器电路

基于 IHP SiGe BiCMOS 工艺, 本文研究和实现了两种 220 GHz 低噪声放大器电路。一种为四级共基极 220 GHz 低噪声放大电路, 另一种为四级共射共基 220 GHz 差分低噪声放大电路, 每级都采用了共射共基的电路结构。

## 1 两种低噪放电路设计

图 1 为 220 GHz 四级共基极低噪声放大器电路图。通过电阻 R1 和 R2 分压,  $V_{cb}$  为共基极晶体管提供基极偏置电压, 传输线  $TL_{sh}$  不仅为晶体管的发射极提供直流偏置, 同时与  $TL_{ser}$  和 MIM 电容 C1、C2、C3、C4、C5 构成输入、输出和级间阻抗匹配网络。传输线  $TL_{load}$  是每级共基极电路的负载。  $C_{byp}$  为共基极放大管的基极和直流电源提供交流地。另外, 集电极相连的电阻  $R_{byp}$  和  $C_{byp}$  构成直流电源 VCC 的低通滤波器, 有助于改善各级共基极放大电路之间的隔离。输入输出焊盘电容  $C_{bondpad}$  也被包括和设计在输入和输出匹配网络中。

由于共基极低噪声放大器利用了基极的交流地连线作为基极的小电感正反馈, 激发提高了共基极低噪放的增益, 因此单端共基极低噪声放大器具有低功耗和高增益的优点。另外与共发射极电路结构相比, 共基极低噪放不存在

米勒效应, 因此具有高带宽的优点。

图 2 所示为 220 GHz 四级差分共射共基低噪放的原理图。晶体管 B1、B2、B3 和 B4 形成一级差分共射共基放大电路。TL5 和 TL6 是差分共射共基放大电路的感性负载。C7 和 C8 为基极的交流地耦合电容。C1 和 C2、C5 和 C6 是为级间交流耦合电容。传输线 TL3 和 TL4 是四级低噪声放大器输入端匹配网络。传输线 TL1 和 TL2 是每级共射共基放大电路的输入匹配网络。第 2 级、第 3 级和第 4 级共射共基电路与第一级差分共射共基电路相同。电容器  $C_{out1}$  和  $C_{out2}$  用于输出阻抗匹配。图 2 左侧显示了该差分共射共基低噪放的偏置电路。晶体管 B5~B8 构成了偏压电路的核心。B6 和 B7 是由二极管连接的晶体管。电阻 RVB1~RVB4 在晶体管 B1~B4 的基端提供偏置电压。电阻 Rb 和 RVB1 的电阻之比为 8:1, 这与晶体管 B1 和 B6 的晶体管长度比一致, 使得 B1 和 B2 的基极偏置电压被强制等于 B6 的基极偏置电压。

在 220 GHz 四级差分共射共基低噪放的输入和输出端采用了 Marchand Balun 以提供单端到差分和差分到单端的转换。图 3 为用微带传输线实现的 Marchand-Balun 的尺寸和版图。

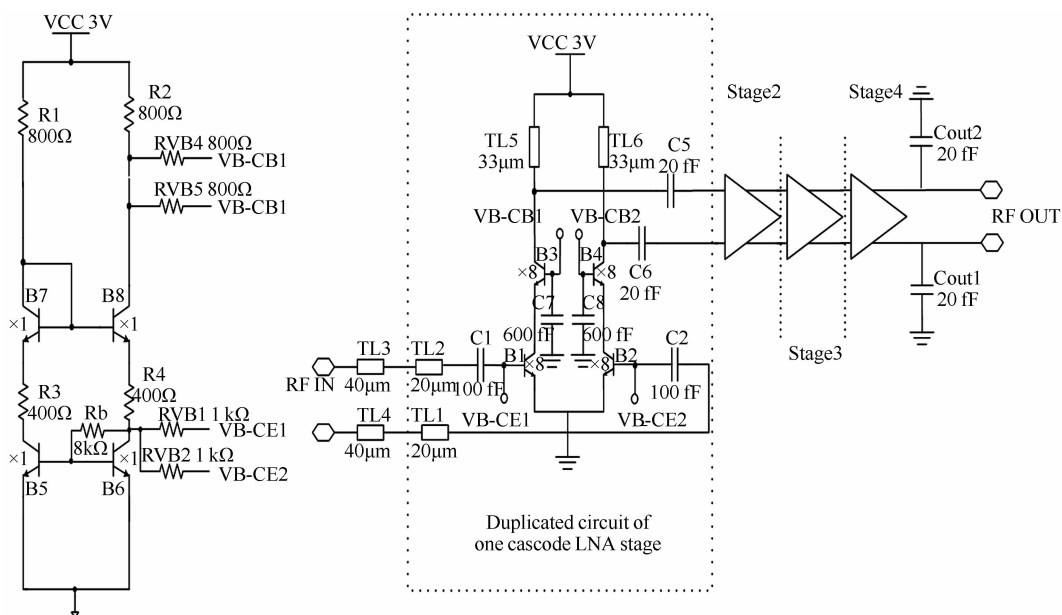


图 2 220 GHz 四级共射共基低噪声放大器电路图

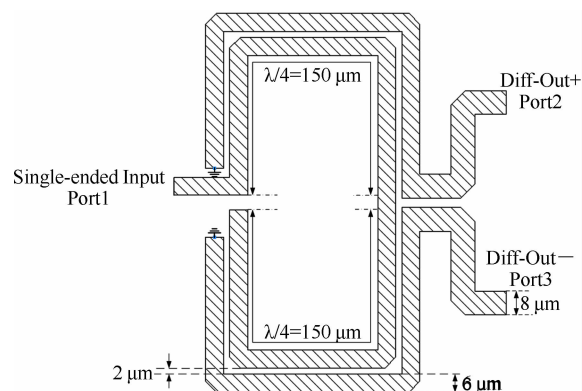


图 3 Marshand Balun 的版图

220 GHz 微带传输线的四分之一波长是  $150 \mu\text{m}$ ，所以 Marshand-Balun 的体积可以做得很小，使得片上 220 GHz Marshand-Balun 的设计成为可能。将单端输入传输线和差分输出传输线的耦合宽度优化为  $2 \mu\text{m}$ 。金属层 1 用作 Marchand-Balun 的地。根据仿真结果，在 220 GHz 时 Balun 的损耗约为 1.4 dB。

在仿真中，为了提高 220 GHz 低噪放的增益，对所有低噪放级间、低噪声放大器与 Marshand-Baluns 的级间进行了紧凑的共轭阻抗匹配，因此，该低噪声放大器为窄带四级共射共基低噪声放大器。

## 2 低噪放版图设计

220 GHz 单端共基极低噪声放大器版图如图 4 所示。芯片尺寸为  $0.42 \text{ mm} \times 0.46 \text{ mm}$ 。图 4 左侧和右侧分别是输入和输出 GSG 焊盘，顶部是电源 VCC 和地。电源和地之间包含了大面积的去耦 MIM 电容器。

220 GHz 四级共射共基差分低噪声放大器版图如图 5 所示。芯片的面积为  $0.94 \text{ mm} \times 0.73 \text{ mm}$ 。图 5 版图的左侧和右侧分别是输入和输出 GSG 焊盘，顶部为电源 VCC 和地，电源和地之间用大面积 MIM 电容去耦。低噪放的输入采用 Marchand-Balun 实现单端到差分的转换，输出端采用 Marchand-Balun 实现差分到单端的转换。

## 3 测试结果

当电源电压为 1.8 V，基极偏置电压 VCB

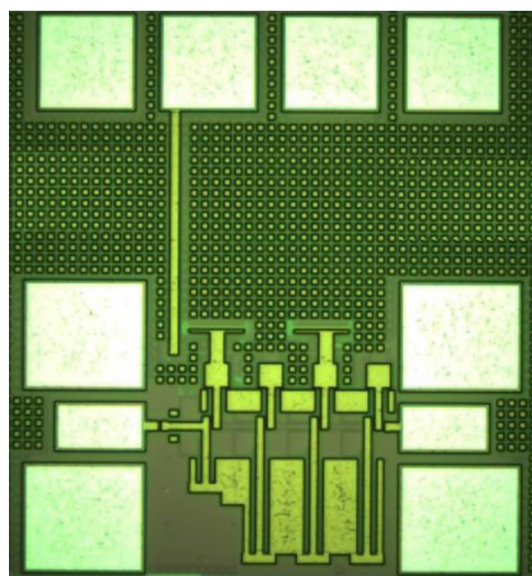


图 4 220 GHz 单端共基极低噪放版图

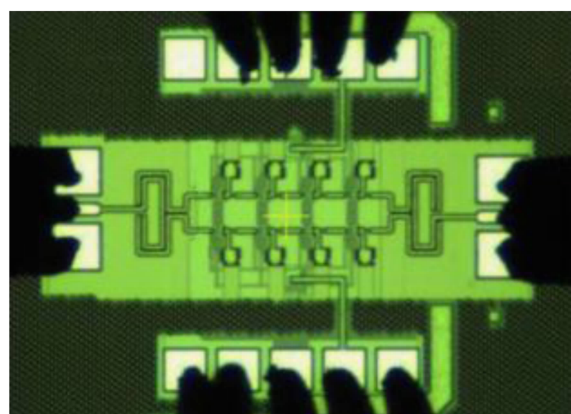


图 5 220 GHz 四级差分共射共基低噪放版图

为 1.6 V 时，四级单端共基极低噪放功耗为  $1.8 \times 14 \text{ mW}$ 。图 6 为 220 GHz 低噪声放大器的 S 参数  $S_{21}$  的测试结果，图 7 为低噪放的 S 参数输入输出反射系数  $S_{11}$ 、 $S_{22}$  的测试结果。在 220 GHz，低噪放有 16 dB 的增益，输入输出反射系数在 -5dB 以下。该低噪放在 225 GHz 具有最大增益 17.7 dB，3 dB 带宽在 215 ~ 242 GHz 之间，具有 27 GHz 的 3 dB 带宽。在测试频带内，稳定系数 K 始终大于 1，因此低噪放始终保持稳定。

图 8 和图 9 显示了四级差分共射共基低噪放的 S 参数测量结果。图 8 给出了低噪放增益  $S_{21}$  的测量和仿真结果。测量结果与仿真结果基本一致，除了一定的频偏以及带宽略有不同。

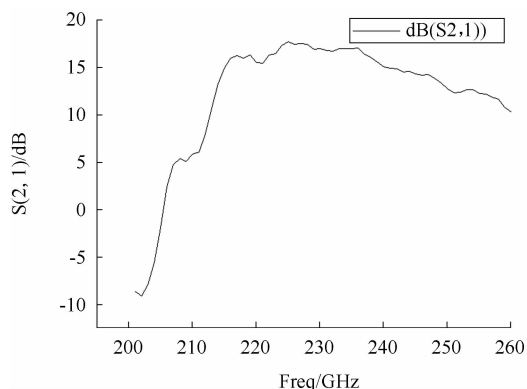


图6 220 GHz 单端共基极低噪放 S21 的测试结果

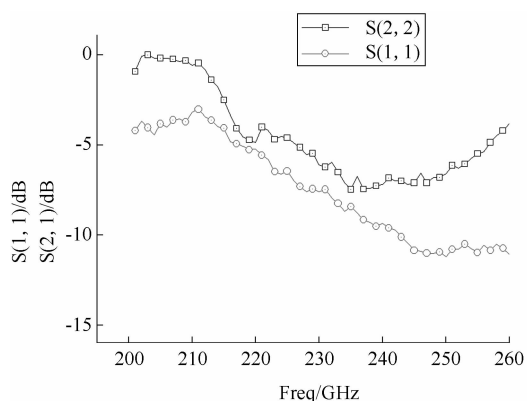


图7 220 GHz 单端共基极低噪放 S11、S22 的测试结果

从测量结果中看,在 223.4 GHz 频点处,低噪放增益达到了 21.6 dB 的峰值增益。在 226 GHz 时,增益 S21 降至 18.3 dB,比峰值增益小 3 dB。在 220 GHz 处, S21 下降到 19.3 dB。该差分低噪放的 3 dB 带宽大于 6 GHz (由于测试设备限制,下限测试频率最低为 220 GHz),频率范围在 220~226 GHz 之间。图 9 给出了差分低噪放的输入输出反射系数 S11 和 S22 的测量和仿真结果。除某些频移外,测量结果与仿真结果吻合较好。在测试频带内,稳定系数  $K$  始终大于 1,因此低噪放始终保持稳定。

表 1 将本文研究的两个 220 GHz 低噪放与目前的研究现状进行了对比。从表 1 可知,与文献 [10]~[13] 相比,本文的 220 GHz 低噪放 1 (四级单端共基极低噪放) 具有低功耗、高带宽的优点。从表 1 可知,随着低噪放级数的增加,低噪放带宽不断减少,而低噪放 1 (四级单端共基极低噪放) 由于采用了共基极的电

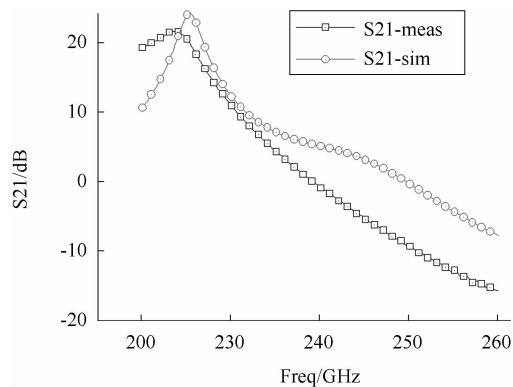


图8 220 GHz 差分共射共基极低噪放 S 参数 S21 的测试结果

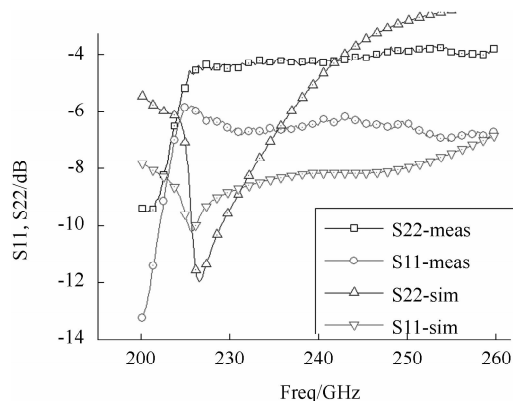


图9 220 GHz 差分共射共基极低噪放输入输出反射系数 S11 和 S22 的测试结果

路结构,即使采用了四级共基极级联的电路结构,仍然具有高带宽的优势。文献 [12]、[13] 以及本文的低噪放 2 (四级差分共射共基低噪放) 与本文的低噪放 1 (四级单端共基极低噪放) 相比,由于级联级数增加,带宽明显小很多。文献 [11] 中的低噪放同样采用了共基极结构,但是由于是差分低噪放,因此功率远大于本文中的低噪放 1 (四级单端共基极低噪放)。本文的低噪放 2 (四级差分共射共基低噪放) 与文献 [10] 相比,具有更高的增益、相当的噪声性能和较低的带宽;与文献 [12] 相比,具有更高的增益、相当的噪声性能和带宽以及更低的功耗;与文献 [13] 相比,具有相当的增益、带宽、噪声性能和较高的功耗,但是稳定性比文献 [13] 好。

#### 4 结论

研究了两种应用于移动终端与静止非移动

表 1 研究现状对比

	RF f/GHz	$f_T/f_{max}$ (GHz)	工艺	增益 G/dB	功耗 (mW)	噪声系数 NF/dB	带宽 B/GHz	级数
文献 [10]	220	300/500	SiGe BiCMOS	15	151	13 (sim)	28	3
文献 [11]	230	300/500	SiGe BiCMOS	10	153	—	40	5
文献 [12]	245	300/500	SiGe BiCMOS	18	303	11±1	8	5
文献 [13]	233	300/500	SiGe BiCMOS	22	68	12.5 (sim)	10	4
本文低噪放 1 四级单端共基极低噪放	220	300/500	SiGe BiCMOS	16	25	11.5 (sim)	27	4
本文低噪放 2 四级单端共基极低噪放	220	300/500	SiGe BiCMOS	22	234	13 (sim)	>6	4

固定设备之间太赫兹高速通信的 220 GHz 接收机, 或者应用于移动终端之间太赫兹高速通信的 220 GHz 接收机中的低噪声放大器电路。低噪放 1 为 220 GHz 宽带四级单端共基极低噪声放大器电路, 该电路实现了 16 dB 增益和 27 GHz 3 dB 带宽, 功耗仅为 25 mW。低噪放 2 为 220 GHz 窄带四级差分共射共基低噪声放大器电路, 该电路实现了 22 dB 的增益和大于 6 GHz 的 3 dB 带宽。下一步将会把这两种低噪声放大器电路集成于太赫兹高速通信的 220 GHz 接收机中。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] Hamada H, Kosugi T, Song H J, et al. 300-GHz Band 20-Gbps ASK Transmitter Module Based on InP–HEMT MMICs [C]. New Orleans: 2015 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS), 2015.
- [3] Katayama K, Takano K, Amakawa S, et al. CMOS 300-GHz 64-QAM Transmitter [C]. San Francisco: 2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), 2016.
- [4] 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.
- [5] Rodríguez-Vázquez P, Grzyb J, Sarmah N, et al. A 65 Gbps QPSK One Meter Wireless Link Operating at a 225–255 GHz Tunable Carrier in a SiGe HBT Technology [C]. Anaheim: 2018 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), 2018.
- [6] Elkhoully M, Mao Y F, Meliani C, et al. A 245 GHz ASK Modulator and Demodulator with 40 Gbits/sec Data Rate in 0.13  $\mu\text{m}$  SiGe BiCMOS Technology [C]. Seattle: 2013 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT), 2013.
- [7] Elkhoully M, Mao Y F, Meliani C, et al. A G-Band Four-element Butler Matrix in 0.13  $\mu\text{m}$  SiGe BiCMOS Technology [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2014, **49**(9): 1916–1926.
- [8] Elkhoully M, Mao Y F, Glisic S, et al. A 240 GHz Direct Conversion IQ Receiver in 0.13  $\mu\text{m}$  SiGe BiCMOS Technology [C]. Seattle: 2013 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC), 2013.
- [9] Song H J, Kosugi T, Hamada H, et al. Demonstration of 20-Gbps Wireless Data Transmission at 300 GHz for KIOSK Instant Data Downloading Applications with InP MMICs

- [C]. San Francisco: 2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), 2016.
- [10] Ojefors 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] Yoon D, Kim N, Pfeiffer U, et al. A Wide Band 215-255 GHz CB Differential Amplifier in a 0.25  $\mu\text{m}$  SiGe HBT Technology [C]. Seoul: 2013 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), 2013.
- [12] Schmalz K, Borngraber J, Mao Y F, et al. A 245 GHz LNA in SiGe Technology [J]. *IEEE Microw Wireless Components Letters*, 2012, **22**(10): 533-535.
- [13] Malz S, Heinemann B, Pfeiffer U R. A 233-GHz Low Noise Amplifier with 22.5 dB Gain in 0.13  $\mu\text{m}$  SiGe [C]. Rome: 9th European Microwave Integrated Circuit Conference (EuMIC), 2014.