

文章编号: 2095-4980(2020)03-0364-05

基于 CMOS 工艺的太赫兹振荡器

汪柏康, 徐雷钧*, 白雪

(江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 在太赫兹频段, 无源器件电容电感的品质因数低、电路的寄生参数以及 MOS 管的截止频率影响使太赫兹振荡器电路难以实现高功率输出。提出一种 300 GHz 可调谐振荡器, 首先, 采用改进的交叉耦合双推(Push-Push)振荡器结构, 通过输出功率叠加的方法输出二次谐波 300 GHz 信号, 增加了振荡器的输出功率并突破了 MOS 管截止频率, 并通过增加栅极互连电感增加输出功率。其次, 太赫兹振荡器摒弃传统片上可变电容调谐的方式, 通过调节 MOS 管衬底电压改变 MOS 管的栅极寄生电容实现频率调谐, 避免太赫兹频段引入低 Q 值电容, 进一步增加了输出功率。提出的太赫兹振荡器采用台积电 40 nm CMOS 工艺, 基波工作频率为 154.5 GHz, 输出二次谐波为 309.0 GHz, 输出功率可达 -3.0 dBm, 相位噪声为 -79.5 dBc/Hz@1 MHz, 功耗为 28.6 mW, 频率调谐范围为 303.5~315.4 GHz。

关键词: Push-Push 振荡器; CMOS 工艺; 太赫兹源; 高输出功率

中图分类号: TN216

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019204

Terahertz oscillator in CMOS

WANG Baikang, XU Leijun*, BAI Xue

(College of Electrical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212013, China)

Abstract: In the THz frequency band, the low quality factor of passive device capacitance inductance, the influence of parasitic circuit parameters and cut-off frequency of Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor(MOSFET) make it difficult for THz oscillator circuit to achieve high power output. A 300 GHz tuning oscillator is proposed to achieve high power output. Firstly, the structure of cross coupled Push-Push oscillator is adopted to realize the second harmonic signal output of 300 GHz. Through the method of power synthesis, the proposed oscillator exports the second harmonic 300 GHz signal, which increases the output power of the oscillator and breaks through the cut-off frequency of MOSFET. The gate interconnection inductance is also adopted to increase the output power. Secondly, instead of tuning with a variable capacitor on the chip, the Push-Push oscillator modulates the substrate voltage of MOSFET to adjust the parasitic gate capacitors of MOSFET to achieve frequency tuning, further increasing the output power. The proposed push-push oscillator is fabricated in TSMC 40 nm CMOS process. By extracting the second harmonic signal and using the substrate voltage tuning technology, the proposed coupled Push-Push oscillator has a peak output power of -2.2 dBm at 309.0 GHz and achieves 303.5-315 GHz tuning range. The phase noise of the oscillator is -79.5 dBc/Hz at 1 MHz offset and the power consumption is 28.6 mW.

Keywords: Push-Push oscillator; CMOS; THz source; high output power

太赫兹波^[1]指频率在 0.1~10 THz 之间的电磁波, 在电磁波谱上位于微波与红外之间, 兼具电子学与光子学的特征。由于太赫兹波具有高穿透性、高频谱分辨力以及非电离等特性, 太赫兹技术广泛应用于成像与谱分析^[2]、安全检查^[3]、无损检测^[4]等领域。太赫兹源是太赫兹技术发展的基础与前提, 太赫兹源主要可以通过光电导^[5]、

收稿日期: 2019-06-12; 修回日期: 2019-07-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61874050; 61574036)

作者简介: 汪柏康(1994-), 男, 在读硕士研究生, 研究方向为集成电路设计。email:15751003349@163.com

*通信作者: 徐雷钧 email:xlking@ujs.edu.cn

光整流^[6]、激光器^[7]以及固态振荡器^[8]这 4 种方式产生。然而基于光电导、光整流、激光器设计的太赫兹源需要单独的频率源或者激光器触发,无法集成于单片集成电路,其体积较大、成本较高、不宜移动等特点限制了其发展,基于固态振荡器设计的太赫兹源因为其体积小、成本低、便携式等优点得到迅速发展。

高功率太赫兹振荡器是太赫兹技术发展的关键点之一^[9]。在太赫兹频段,无源器件电容电感的品质因数低、电路的寄生参数以及 MOS 管的截止频率的影响使得太赫兹振荡器电路难以实现高功率输出。随着制造工艺的改进,TSMC 40 nm CMOS 工艺的截止频率可以达到 270 GHz^[10]。基于变压器结构的 Push-Push 振荡器^[11]以及电容调谐式的 Push-Push 振荡器^[12]也可以实现太赫兹频段的信号输出,但由于电路中引入的无源器件可变电容带来的电路损耗使得输出功率降低。在太赫兹频段,多核心振荡器电路拓扑结构^[13-14]利用多个振荡器同时工作可以实现高功率输出,但多核心器件也会大大增加芯片面积,消耗更多电源功率的同时也会降低工作效率。本文提出了一种交叉耦合 Push-Push 振荡器电路,通过控制 MOS 管衬底偏压改变 MOS 管寄生电容实现频率调谐,并通过增加栅极互连电感增加输出功率,基于 40 nm CMOS 工艺的仿真结果表明,振荡器输出二次谐波 309.0 GHz 信号,输出功率为-3.0 dBm,频率调谐范围为 303.5~315.4 GHz。

1 传统交叉耦合 Push-Push 振荡器电路

传统 Push-Push 电路^[15]如图 1 所示,单个 LC 电路的相移可以达到 180°,Push-Push 振荡器是由 2 个相同的 LC 电路级联,使振荡器在谐振时环路相移达到 360°,满足巴克豪森振荡准则,能够允许自身噪声增长变成周期性的信号。传统交叉耦合 Push-Push 振荡器的谐振腔是由 MOS 管的漏级电感、可调谐电容组成,在频率为 $\omega = \sqrt{LC}$ 时发生谐振,交叉耦合的 MOS 管电路形成负阻,提供电路的损耗,使得振荡能够持续发生。

传统交叉耦合振荡器的结构原理图如图 2 所示,振荡器 1 的输出表达式为:

$$U_1(t) = \sum_0^{\infty} a_n \cos(n\omega_0 t + \varphi_n) \tag{1}$$

式中 φ_n 为输出电压相位。振荡器 2 的输出表达式为:

$$U_2(t) = \sum_0^{\infty} a_n \cos(n\omega_0 t + \varphi_n + n\pi) \tag{2}$$

式中 n 为谐波信号的次数。振荡器 1 和振荡器 2 的输出之和为:

$$U_{out}(t) = U_1(t) + U_2(t) = \sum_{n=2,4,L}^{\infty} 2a_n \cos(n\omega_0 t + \varphi_n) \tag{3}$$

从式(3)可以看出,谐波次数为奇次谐波时,振荡器的输出相位相反,信号相互抵消;谐波次数为偶次谐波时,振荡器的输出相位相同,信号叠加输出,使得交叉耦合 Push-Push 振荡器既可以突破 MOS 管截止频率的限制,又可叠加输出偶次谐波信号,得到较好的输出功率。

2 改进交叉耦合 Push-Push 振荡器电路

相较于传统交叉耦合振荡器,改进型的交叉耦合 Push-Push 振荡器电路(图 3)增加了栅漏电感 L_g 、栅极互连电感 L_m 以及 MOS 管衬底偏压调节。交叉耦合 Push-Push 振荡器采用 NMOS 管来构成差分负阻,由于 NMOS 管相较于 PMOS 管,载流子迁移率较高,在相同管子尺寸和偏置电压条件下,NMOS 管可以实现较大的负阻。

传统调谐振荡器的调谐是通过改变可变电容的控制电压改变可变电容的容值,从而实现频率调谐,但当频率上升到太赫兹频段,可变电容的低 Q 值特性在限制振荡器的调谐范围的同时也会降低输出功率。改进的 Push-Push 振荡器电路通过改变 MOS 管的衬底偏压改变 MOS 管寄生电容进行频率调谐,避免了引入可变电容调谐带来的损耗。交叉耦合

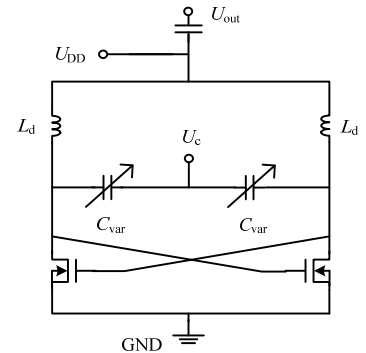


Fig.1 Schematic of traditional cross coupling Push-Push oscillator

图 1 传统交叉耦合 Push-Push 振荡器原理

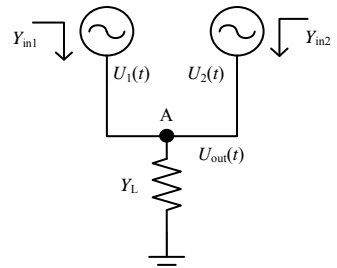


Fig.2 Structure of traditional cross coupling Push-Push oscillator

图 2 传统交叉耦合 Push-Push 振荡器结构

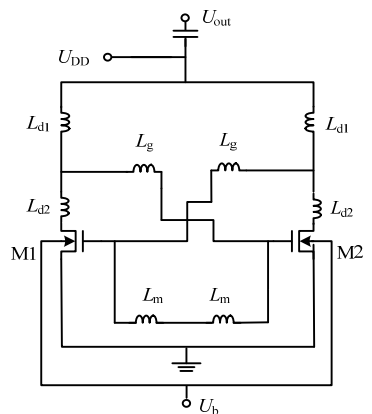


Fig.3 Schematic of promoted cross coupling Push-Push oscillator

图 3 改进交叉耦合 Push-Push 振荡器原理

Push–Push 振荡器谐振腔简单等效模型见图 4, R_p 是等效电阻, R_n 是等效负阻, C_{eff} 是等效电容, L_{d1} 为振荡器电源端电感。基波振荡频率表达式为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{2C_{eff}L_{d1}}} \quad (4)$$

交叉耦合 Push–Push 振荡器抑制基波信号, 输出频率为 $2f_0$ 的信号, 当 C_{eff} 增大时, 振荡器的输出频率下降, 在 L_{d1} 无法调节的情况下, 振荡器的输出频率调谐范围由 C_{eff} 控制。

交叉耦合 Push–Push 振荡器的交流等效模型如图 5 所示, 其中 C_d 是 MOS 管漏级寄生电容, C_g 是 MOS 管栅极寄生电容, C_{eff} 表达式为:

$$C_{eff} = \frac{C_g}{2(1-\omega^2C_gL_g)^2} + \frac{C_d}{2(1-\omega^2C_dL_{d2})^2} \quad (5)$$

式中: ω 为振荡角频率; L_{d2} 为振荡器漏极电感。等效电容 C_{eff} 由寄生电容 C_g 与 C_d 控制, 改进的交叉耦合 Push–Push 振荡器通过改变衬底电压 U_b 改变 MOS 管寄生电容 C_g 与 C_d 从而实现频率调谐。

等效跨导 $G_m (= -1/R_n) > 1/R_p$ 时, 电路满足开始起振条件, 为了获得更高的电压摆幅, 等效跨导 G_m 应远远大于 $1/R_p$, 因此 $G_m R_p$ 的幅值也可以表示为电路的电压增益。在栅极互连电感 L_m 没有加入电路时, $G_m R_p$ 的表达式为:

$$G_m R_p = \frac{g_m R_v (1 - \omega^2 C_g L_g)}{1 - \omega^2 C_d L_{d1}} \quad (6)$$

C_g 和 L_g 的增大都会使电压增益变低, 在太赫兹频段, 无源器件的低 Q 值特性以及衬底的高损耗特性也会使得输出功率的效果变差, 在改进的交叉耦合振荡器电路中, 提出增大栅极互连电感 L_m 来增大振荡器的输出功率。增大栅极互连电感 L_m 后的电压增益 $G'_m R'_p$ 的表达式为:

$$G'_m R'_p = \frac{g_m R_v [1 + (1/L_m - \omega^2 C_g) L_g]}{1 - \omega^2 C_d L_{d1}} \quad (7)$$

可以看出, 很小的栅极互连电感可以增大 $G'_m R'_p$ 的幅值, 使得电路的电压摆幅增大, 可得到更高的输出功率。

3 电路结果分析及版图设计

提出的 Push–Push 振荡器采用 TSMC 40 nm 工艺, 电感采用距离衬底最远, 厚度最大的顶层金属 M10 设计, M10 等效电阻更小, TSMC 高损耗硅基衬底对电感的影响也更小。电感采用 ADS EM 工具仿真, 所有电感设计成一个整体 5 端口环状结构进行电路后仿真校验, 电感模型如图 6 所示, 其品质因数如图 7 所示。通过优化后电感的宽为 $7 \mu\text{m}$, 采用 45° 折线对称结构可以有效降低损耗, 增加电感的 Q 值, 在 154.5 GHz 时电感的品质因数可达 24.4。

摒弃传统的可变电容调谐方式, 提出的 Push–Push 振荡器通过改变 MOS 管的衬底偏压来实现频率调谐, 扫描栅极偏压大小从 -1 V 到 1 V 时, 振荡器输出频率为 303.5~315.4 GHz, 调谐范围可达 4%, 结果如图 8 所示。在半导体制造时, 由于工艺偏差, 载流子迁移率不同, 因此, 在不同工艺角 tt (typical process)、 ss (slow process)、 ff (fast process) 下对振荡器进行频率稳定性仿真, 振荡器的工作频率在 300~321 GHz 之间, 频率偏移不超过 2%, 频率稳定性表现良好, 对相位噪声无影响。

高品质因数电感的设计及摒弃调谐电容电路结构的选择降低了振荡器的相位噪声, 图 9 显示了振荡器的相位噪声, 在 1 MHz 频偏处振荡器的相位噪声为 -79.5 dBc/Hz 。

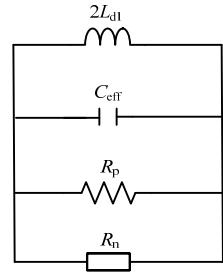


Fig.4 Equivalent model of promoted cross coupling Push–Push oscillator
图 4 振荡器谐振腔简单等效模型

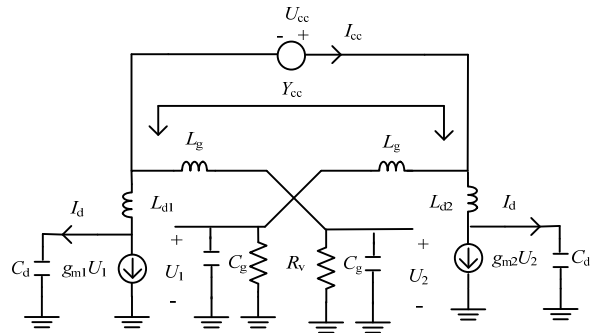


Fig.5 Ac equivalent model of promoted cross coupling Push–Push oscillator
图 5 交叉耦合 Push–Push 振荡器交流等效图



Fig.6 Model of the oscillator inductance
图 6 振荡器电感模型图

将 ADS 仿真得到的无源器件电感整体的 S 参数文件代入 Cadence 中进行后仿真校验, 振荡器起振正常, 在衬底偏压 $U_b=0.2\text{ V}$ 时, 振荡器二次谐波输出功率为 -3.01 dBm , 波形如图 10 所示。

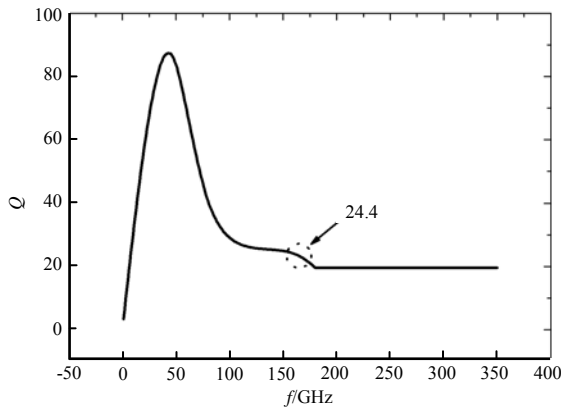


Fig.7 Quality factor of the oscillator inductance
图 7 振荡器电感品质因数 Q 值

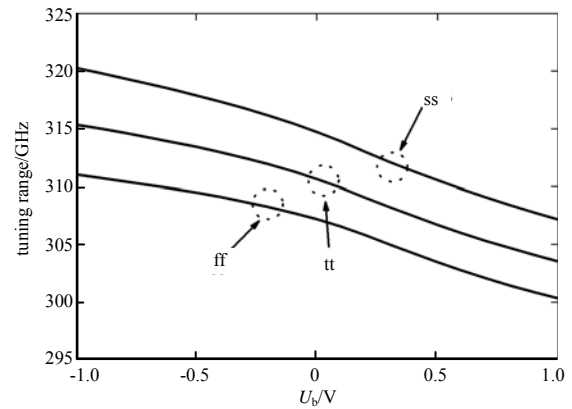


Fig.8 Tuning range of the oscillator inductance
图 8 振荡器调谐范围

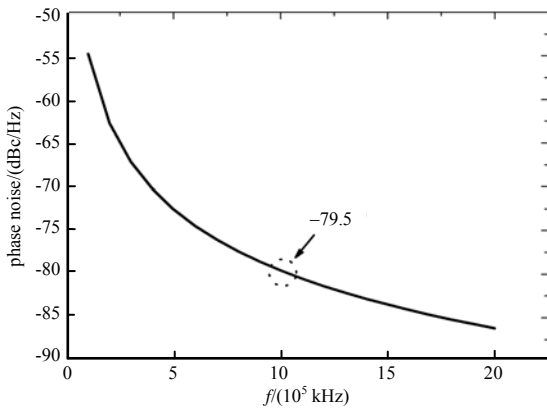


Fig.9 Phase noise of the oscillator
图 9 振荡器相位噪声

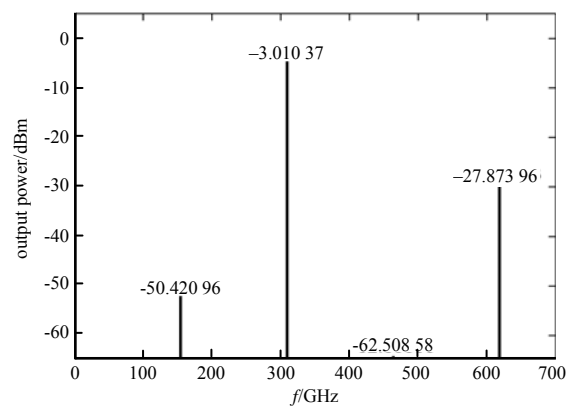


Fig.10 Output power of the oscillator
图 10 振荡器输出功率

采用 40 nm CMOS 工艺设计在片测试 Push–Push 振荡器版图见图 11, 芯片面积为 $260\ \mu\text{m}\times 360\ \mu\text{m}$, 振荡器核心电路面积为 $78\ \mu\text{m}\times 104\ \mu\text{m}$, 版图功率输出及电压输入采用 G–S–G 结构设计, 即地–信号–地结构。核心谐振腔电路周围铺地, 电源输入焊盘与信号地焊盘之间引入 50 fF 电容, 降低信号干扰对核心振荡器的影响。振荡器电路采用完全对称结构, 抵消衬底及电源带来的影响, 更好地抑制基波信号, 输出二次谐波信号, 进一步提高电路性能。

目前 40 nm 工艺设计的单太赫兹振荡器电路输出功率一般在 -15 dBm 左右, 也就是 0.03 mW , 高功率是指单太赫兹振荡器电路输出功率 -10 dBm 以上, 也就是指 0.1 mW 以上的输出。从表 1 可以看出, 本文基于 40 nm CMOS 工艺设计的振荡器在振荡频率为 309 GHz 处实现了输出功率 -3 dBm , 较文献[10–12]输出功率有明显提升, 证明了增大栅极互连电感以及摒弃高损耗可变电容的方式实现了太赫兹频段的高输出功率, 同时高损耗可变电容的去除了也减少了整体的功耗, 使得电路的转换效率得到提升。

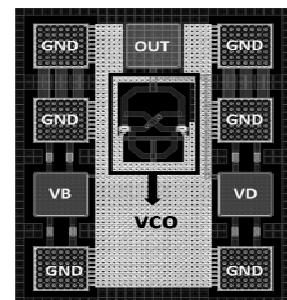


Fig.11 Layout of promoted Push–Push oscillator
图 11 Push–Push 振荡器版图

表 1 太赫兹振荡器性能比较

Table1 Parameters comparison of terahertz oscillator

reference	technology	f/GHz	$P_{\text{out}}/\text{dBm}$	P_{DC}/mW	tuning range/%	phase noise/(dBc/Hz)
[10]	40 nm CMOS	340.6	-11.1	34.1	NA	NA
[11]	65 nm CMOS	101.0	NA	11.9	11.2	-104.5@10 MHz
[12]	65 nm CMOS	163.0	-14.0	33.0	14.0	-91.3@1 MHz
this work	40 nm CMOS	309.0	-3.0	28.6	4.0	-79.5@1 MHz

4 结论

本文提出了改进的交叉耦合 Push-Push 振荡器结构,在传统交叉耦合结构叠加偶次谐波信号增加输出功率的基础上,通过增大栅极互连电感增大输出功率。摒弃传统的可变电容振荡器电路调谐方式,通过改变振荡器的衬底电压改变 MOS 管的寄生电容进行频率调谐,避免了太赫兹频段低 Q 值的电容引入的损耗。通过台积电的 40 nm CMOS 仿真结果分析,本文提出的交叉耦合 Push-Push 振荡器的基波工作频率为 154.5 GHz,输出二次谐波 309.0 GHz 信号,输出功率可达 -3.0 dBm,相位噪声为 -79.5 dBc/Hz@1 MHz,功耗为 28.6 mW,频率调谐范围为 303.5~315.4 GHz。

参考文献:

- [1] 张健,邓贤进,王成,等. 太赫兹高速无线通信:体制、技术与验证系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(1): 1-13. (ZHANG Jian,DENG Xianjin,WANG Cheng,et al. Terahertz high speed wireless communications:systems,techniques and demonstrations[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(1):1-13.)
- [2] TRICHOPOULOS G C,MOSBACKER H L,BURDETTE D,et al. A broadband focal plane array camera for real-time THz imaging applications[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2013,61(4):1733-1740.
- [3] LIU H B,ZHONG H,KARPOWICZ N,et al. Terahertz spectroscopy and imaging for defense and security applications[J]. Proceedings of IEEE, 2007,95(8):1514-1527.
- [4] LIU J,LI Z,HU F,et al. A THz spectroscopy nondestructive identification method for transgenic cotton seed based on GA-SVM[J]. Optical and Quantum Electronics, 2015,47(2):313-322.
- [5] 程伟,王迎新,赵自然. 光电导太赫兹源新进展[J]. 激光与红外, 2011(6):597-604. (CHENG Wei,WANG Yingxin,ZHAO Ziran. New advances in photoconductance terahertz sources[J]. Laser and Infrared, 2011(6):597-604.)
- [6] 钟森城,翟召辉,朱礼国,等. 基于 LiNbO₃光整流效应的高峰值功率太赫兹源[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 13(2):189-194. (ZHONG Sencheng,ZHAI Zhaohui,ZHU Ligu,et al. Peak power terahertz source based on LiNbO₃ optical rectification effect[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(2):189-194.)
- [7] HÜBERS H W,EICHHOLZ R,PAVLOV S G,et al. High resolution terahertz spectroscopy with quantum cascade lasers[J]. Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves, 2013,34(5-6):325-341.
- [8] 王科迪. CMOS 太赫兹可调谐信号源的设计[D]. 南京:东南大学, 2016. (WANG Kedi. Design of CMOS terahertz tunable signal source[D]. Nanjing,China:Southeast University, 2016.)
- [9] 洪伟,余超,陈继新. 毫米波与太赫兹技术[J]. 中国科学:信息科学, 2016(8):1086-1107. (HONG Wei,YU Chao,CHEN Jixin. Millimeter wave and terahertz technology[J]. Science in China:Information Science, 2016(8):1086-1107.)
- [10] LI C H,KO C L,KUO C N,et al. A 340 GHz triple-push oscillator with differential output in 40 nm CMOS[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2014,24(12):863-865.
- [11] YI X,BOON C C,LIN J F,et al. A 100 GHz transformer-based varactor-less VCO with 11.2% tuning range in 65 nm CMOS technology[C]// Proceedings of the 38th European Solid-State Circuit Conference(ESSCIRC 2012). Bordeaux,France:IEEE, 2012:293-296.
- [12] KOO H,KIM C Y,HONG S C. A G-band standing-wave Push-Push VCO using a transmission line resonator[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2015,63(3):1036-1045.
- [13] KANANIZADEH R,MOMENI O. A 190-GHz VCO with 20.7% tuning range employing an active mode switching block in a 130 nm SiGe BiCMOS[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2017,52(8):2094-2104.
- [14] HAN R,AFSHAR E. A 260 GHz broadband source with 1.1 mW continuous-wave radiated power and EIRP of 15.7 dBm in 65 nm CMOS[C]// 2013 IEEE International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers. San Francisco, CA,USA:IEEE, 2013:138-139.
- [15] CAO C,SEOK E,KENNETH O. 192 GHz Push-Push VCO in 0.13 μm CMOS[J]. Electronics Letters, 2006,42(4):208-210.