文章编号：2095-4980(2019)02-0322-06

基于 FBAR 谐振器件的 CMOS 振荡电路特性比较

陈振雄[1,2]，高同强*[1,2]，赵思琦[1,2]，方康明[1,2]，赵湛[1,2]，杨海钢[1,2]

(1.中国科学院大学，北京 100190；2.中国科学院 电子学研究所，北京 100190)

摘　要：薄膜体声波谐振器(FBAR)是一种薄膜体声波谐振微机电系统(MEMS)器件，其与振荡电路相结合，可以将大气环境中的湿度、气压等信息转化为高频振荡信号，作为环境参数的度量。振荡电路是 FBAR 检测系统的关键，针对实际应用中 FBAR 品质因数较低，导致频率检测电路功耗大、相位噪声特性差的特点，比较了 3 种频率检测方案，包括现有的 Pierce 振荡器、环形振荡器，以及提出的改进交叉耦合振荡器。3 种振荡器分别采用不同的方法来优化其关键技术指标，通过比对，为进一步的检测系统设计提供帮助。本文所采用的 FBAR 谐振器品质因数为 205.5，采用 SMIC 0.18 μm CMOS 工艺设计振荡电路，所设计的 3 种振荡器功耗分别是 26.3 mW,0.382 mW,4.32 mW，在 1 MHz 频偏时的相位噪声分别是−111 dBc/Hz,−152 dBc/Hz,−126 dBc/Hz，交叉耦合振荡器能满足高精确度的环境变量测量、交叉耦合结构要求。

关键词：薄膜体声波谐振器；振荡器；低功耗；相位噪声

中图分类号：TN432　　**文献标志码：**A　　**doi：**10.11805/TKYDA201902.0322

Comparison of three low-power CMOS oscillators for FBAR resonator applications

CHEN Zhenxiong[1,2]，GAO Tongqiang*[1,2]，ZHAO Siqi[1,2]，FANG Kangming[1,2]，ZHAO Zhan[1,2]，YANG Haigang[1,2]

(1.University of the Chinese Academy of Sciences，Beijing 100190，China；
2.Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences，Beijing 100190，China)

Abstract：Film Bulk Acoustic Resonator(FBAR) can be applied in oscillating circuits to transform humility and pressure of atmosphere into frequency signal. Three kinds of oscillating circuits are designed for the FBAR whose quality factor is low: Pierce oscillator, ring oscillator, improved cross-coupled oscillator. Different methods are adopted in the three kinds of oscillators to optimize phase noise and power dissipation. The quality factor of the FBAR is 205.5, and SMIC 0.18 μm CMOS is utilized. The power dissipation of three kinds of oscillators is respectively 26.3 mW, 0.382 mW, 4.32 mW, and the phases are respectively −111 dBc/Hz, −152 dBc/Hz, −126 dBc/Hz at a 1 MHz offset. The improved cross-coupled oscillator can meet the requirement of precise detector.

Keywords：Film Bulk Acoustic Resonator；oscillator；low-power；phase noise

过去十几年，薄膜体声波谐振器(FBAR)主要用于手机滤波器和双工器，但在最近几年发现了其具有传感器的特性，FBAR 开始逐渐走向应用。FBAR 和振荡电路相结合，可用于环境、湿度和气压的测量。FBAR 传感器的工作原理类似于石英晶体微量天平，根据 Sauerbrey 方程可知[1]，FBAR 谐振频率的变化与其加载的微小质量呈线性关系。FBAR 谐振频率高，因此 FBAR 传感器具有很高的灵敏度。相对于石英晶体微量天平，其具有高集成度、高敏感性的特点。同时其作为新型频率基准的振荡器，与石英晶体振荡器相比，具有频率高、功耗低、面积小等特点[2]。FBAR 振荡器逐渐走入人们的视线，特别是品质因子大于 1 000 的 FBAR 器件。2010 年，Matthew 利用品质因子为 113 的 FBAR 器件制作了 1 个相位噪声为−104 dBc/Hz@100 kHz、振荡频率为 864.5 MHz 的质量传感器[3]；2013 年，WANG H 制作了 1 个相位噪声为−60 dBc/Hz@1 kHz、振荡频率为 1 GHz 的磁场传感器[4]；

收稿日期：2017-11-22；**修回日期：**2018-01-11
基金项目：国家自然科学基金资助项目(61431019)
*通信作者：高同强　email:tqgao@mail.ie.ac.cn

2017 年，Hassan 利用品质因子为 500 的固态装配谐振器(Solidly Mounted Resonators，SMR)制作了一个相位噪声为−126.85 dBc/Hz@1 MHz、振荡频率为 1.75 GHz 的振荡器[5]；2017 年，Arantxa 利用品质因子为 1 200 的声表面波(Surface Acoustic Wave，SAW）器件制作了一个相位噪声为−75 dBc/Hz@1 kHz、振荡频率为 307 MHz 的振荡器[6]。高品质因子的 FBAR 在作为基准振荡器时有重要应用，而作为传感器的 FBAR 器件通常品质因子较低，这会导致功耗和相噪的同时恶化，成为 FBAR 传感器应用时需要克服的难点。现阶段，针对低品质因子的 FBAR 形成的振荡电路研究仍较少[7-9]。

本文选取了适用于低品质因子 FBAR 的 3 种振荡电路方案[10]，通过比较其性能参数，为传感器与检测电路进一步高度集成化提供有益参考。第一种是 Pierce 振荡器，由于所使用的 FBAR 传感器品质因子较低，需要的负阻较大。为了减小功耗，采用三级互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor，CMOS)放大器结构来驱动 FBAR。第二种采用环形振荡器结构，功耗在 3 种方案中最低，但却存在一个环形振荡器的共同缺点——相位噪声性能相对其他 2 种较差。第三种是由传统的交叉耦合 LC 振荡器改进而来，利用了交叉耦合 LC 振荡器低功耗和低相位噪声的特点，并解决了低频锁定的问题。

1　工作原理

1.1 FBAR 器件模型

实际应用中常采用修正的巴特沃兹−范−迪克(Modified Butterworth−Van−Dyke，MBVD)模型来描述 FBAR 器件的电学特性,本文采用的FBAR器件MBVD模型如图1所示[11-12]。FBAR 谐振器具有湿度、温度、压力检测的功能，其阻抗特性如图 2 所示。可以看出，FBAR 器件在大部分频率范围内表现出来的是容抗特性，只在 f_s 和 f_p 之间的一小段频率范围内才呈现出感抗特性。与传统的电感器件相比，FBAR 在低频时呈现出的高阻抗，使得其不能使用简单的交叉耦合 LC 振荡器结构，因为会存在低频锁定问题。而传统的交叉耦合 LC 振荡器具有电流复用及提供大负阻的功能，即具有低功耗的特性。前文提到 FBAR 模型类似于石英晶体模型，传统 FBAR 振荡器主要采用石英晶体振荡器——Pierce 振荡器。与交叉耦合振荡器相比，虽然同样具有低相位噪声的性能，但功耗却相对较大。

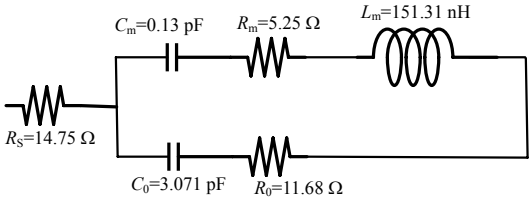


Fig.1 MBVD model of FBAR
图 1 FBAR 的 MBVD 模型

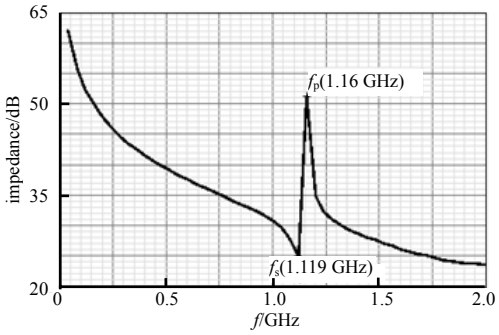


Fig.2 Frequency response of the FBAR resonator
图 2 FBAR 频率响应

FBAR 谐振器的品质因子与石英晶体谐振器计算相同：

$$Q=\sqrt{\frac{L_m}{C_m R_m^2}} \tag{1}$$

因此本文使用的 FBAR 谐振器的品质因子为 205.5。振荡频率取 1.15 GHz，此时 FBAR 等效阻抗为：

$$Z|_{f=1.15\ \mathrm{GHz}}=(53.321+\mathrm{j}43.057)\ \Omega \tag{2}$$

等效品质因子：

$$Q_e|_{f=1.15\ \mathrm{GHz}}=\frac{\mathrm{imag}\{Z\}}{\mathrm{re}\{Z\}}=0.807 \tag{3}$$

1.2 Pierce 振荡器

传统的 Pierce 振荡器[13]如图 3 所示。整个振荡器利用 M_1,M_2 这 2 个 MOS 管构成的反相器形成 Pierce 结构。其中大电阻 R_b 的作用是将 2 个 MOS 管的漏端偏置于 $U_{dd}/2$，以最大化电压摆幅，减小在 FBAR 上面的压降。

M_1,M_2 晶体管共用一路电流，但在计算总跨导时却是两者相加，增加了电流利用的效率，即：

$$G_m=g_{m1}+g_{m2} \tag{4}$$

式中：G_m 是 CMOS 反相器的总跨导；g_{m1},g_{m2} 分别是 M_1,M_2 管的跨导。

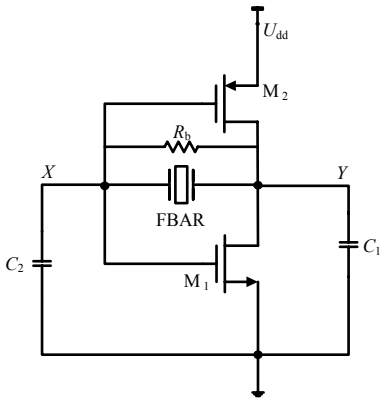


Fig.3 Classical Pierce oscillator
图 3 经典 Pierce 振荡器

电容 C_1,C_2 将 CMOS 反相器的跨导转化成与频率相关的负阻−R，从 X,Y 两端看进去的阻抗为：

$$R=\frac{G_{\mathrm{m}}}{\omega^2 C_1 C_2} \tag{5}$$

$$Z_{XY}=-\frac{G_{\mathrm{m}}}{\omega^2 C_1 C_2}+\frac{1}{\mathrm{j}\omega C_1}+\frac{1}{\mathrm{j}\omega C_2} \tag{6}$$

式中 ω 为角频率。

在振荡频率 ω_{osc} 处，可以将 FBAR 谐振器看作是等效电感 L_{eq} 和等效电阻 R_{eq} 串联而成。根据稳定振荡条件 $R=R_{\mathrm{eq}}$，即：

$$g_{\mathrm{m1}}+g_{\mathrm{m2}}=\omega_{\mathrm{osc}}^2 C_1 C_2 R_{\mathrm{eq}} \tag{7}$$

为减小功耗，必须减小 $g_{\mathrm{m1}},g_{\mathrm{m2}}$。而为了减小 $g_{\mathrm{m1}},g_{\mathrm{m2}}$，则要减小 C_1,C_2。这里的 M_1,M_2 没有工作于亚阈值区来进一步增加电流效率，原因是本文采用的 FBAR 品质因子较低，需要的跨导相对来说比较大，如果工作于亚阈值区域，将会大大增加晶体管面积，这样引入的寄生电容将使得 FBAR 品质因子退化，而且也会进一步增大 C_1,C_2。

为了进一步增大跨导，减小功耗，将单级 CMOS 反相器扩展成三级 CMOS 反相器级联[14]，如图 4 所示。工作原理类似于单级 CMOS 反相器。利用多级结构扩大了跨导，减小了面积以及寄生电容，但电路复杂程度的增加会导致相位噪声的恶化。

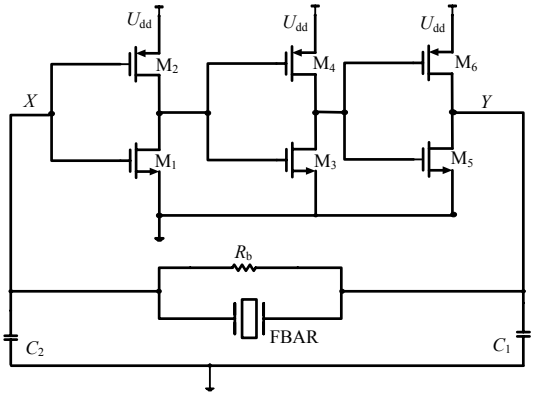


Fig.4 3-class Pierce oscillator
图 4 三级 CMOS 反相器构成的 Pierce 振荡器

1.3 环形振荡器

环形振荡器如图 5 所示，与三级 Pierce 振荡器相比，减少了两边的电容 C_1,C_2，R_{b} 同样是起偏置作用，3 个反相器与 FBAR 构成环路，起振条件即巴克豪森条件：

$$\begin{cases}\left|H(\mathrm{j}\omega)\right|>1\\ \angle H(\mathrm{j}\omega)=360^\circ\end{cases} \tag{8}$$

与 Pierce 振荡器相比，由于不用满足负阻条件，使得功耗大大降低，但由于环形振荡器本身的特性，相位噪声性能与 Pierce 相比较差。

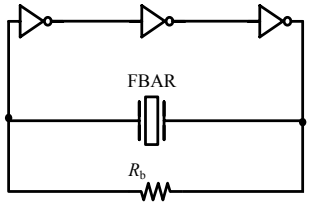


Fig.5 Ring oscillator
图 5 环形振荡器

1.4 交叉耦合振荡器

FBAR 谐振器与传统的电感相比，最大的不同在于其低频端的高阻抗特性[15]，这样的特性在使用交叉耦合振荡器时会引入一个问题：锁定。如图 6 所示，考察电路的静态工作点，由于 FBAR 表现出的高阻抗特性，点 X,Y 之间没有直流通路，电路等效于 1 个双极点反馈系统：假设 U_X 增加，由 M_3,M_4 构成的 CMOS 反相器将会使得 U_Y 减小，而点 Y 是由 M_1,M_2 构成的 CMOS 反相器的输入端，于是其输出端电压增加，即 U_X 增加，构成了正反馈。U_X 近似于 U_{dd}，而 U_Y 近似于 0，电路锁定不能起振。

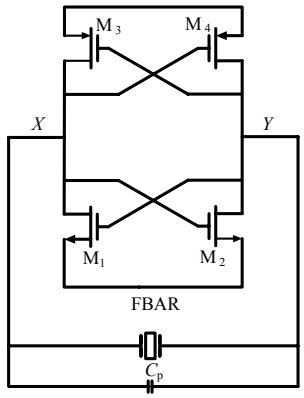


Fig.6 Classic cross-coupled oscillator
图 6 经典交叉耦合振荡器

解决锁定问题的方案如图 7 所示。2 个电阻 R_{b} 串联于点 X,Y 之间，提取出 X,Y 的共模电压 $U_{\mathrm{dd}}/2$，同时这个电压通过电阻 R 给 M_1,M_2,M_3,M_4 偏置。电阻 R_{b} 还在 X,Y 之间形成直流通路，避免出现直流锁定的情况。根据相位噪声的定义可以得出：振荡器中的相位噪声是原本电路的输出噪声通过载波搬移到边带上。为了减小载波附近的相位噪声搬移，需要在反馈环路中引入高通滤波结构。在振荡器稳定振荡的过程中，2 个电阻 R_{b} 的串联节点类似于“虚地”，电容 C 和电阻 R 构成了一个高通回路。考虑 M_3 漏端到 M_4 栅极的传输函数：

$$\frac{U_A}{U_X}(S)=\frac{SCR}{1+SCR} \tag{9}$$

截止频率：

$$f_{\mathrm{r}}=\frac{1}{2\pi RC} \tag{10}$$

于是等效跨导：

$$\left|G_{\mathrm{eq}}\right|=\left|G_{\mathrm{m}}\frac{U_A}{U_X}(S)\right|=\frac{G_{\mathrm{m}}}{\sqrt{1+\left(f_{\mathrm{r}}/f_{\mathrm{c}}\right)^2}} \tag{11}$$

式中 f_{c} 为载波频率，即振荡频率。

交叉耦合振荡器也是负阻振荡器，其产生的负阻由 XY 看进去为：

$$R_{XY}=-\frac{2}{G_{\mathrm{eq}}} \tag{12}$$

起振条件：

$$\left|R_{XY}\right|<R_{\mathrm{eq}} \tag{13}$$

式中 R_{eq} 是 FBAR 的等效电阻。

为了取得较好的滤波效果，需将 RC 取较小值来增加 f_{r}。但 f_{r} 的增加会引起等效跨导 G_{eq} 的减小。为了维持电路起振，需要维持一定的 G_{eq}，这需要增加 G_{m}，即增加功耗。因此需要在相位噪声性能与功耗之间做好取舍。为了进一步减小功耗，所有的 MOS 管都采用体偏置技术，通过减小阈值电压，在较低的电流下能够提供较大的跨导。

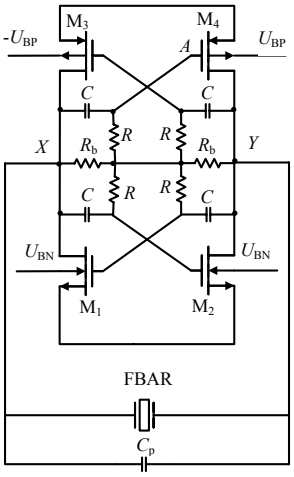
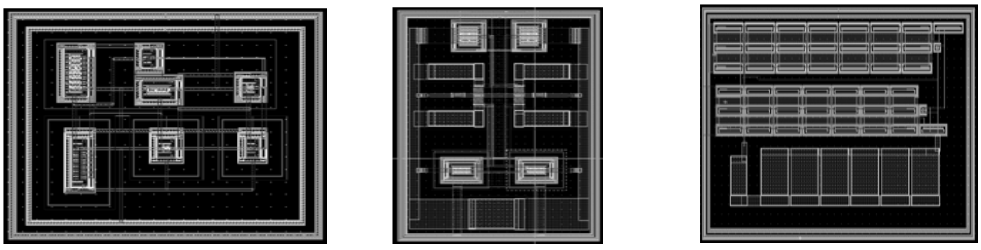


Fig.7 Improved classic cross-coupled oscillator
图 7 改进型交叉耦合振荡器

2　版图设计及后仿真结果

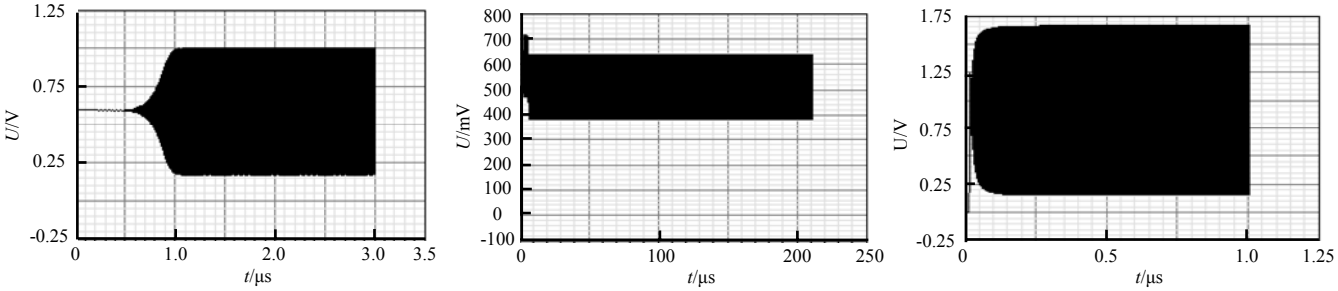
3 种振荡器都采用 SMIC 0.18 μm 工艺，版图设计如图 8 所示。为了使功耗振荡器工作电压尽可能低，其中 Pierce 三级振荡器工作于 1.8 V，环形 FBAR 振荡器工作于 1 V，而交叉耦合振荡器工作于 1.2 V。后面 2 种振荡器都采用体偏置技术来降低阈值电压，而 Pierce 三级振荡器由于电源电压过高，不适合采用体偏置技术。



(a) layout of ring oscillator　(b) layout of cross-coupled oscillator　(c) layout of Pierce oscillator

Fig.8 Oscillator layouts
图 8 振荡器版图

3 种振荡器的振荡频率都在 1.15 GHz 左右，经后仿真功能测试，其瞬态波形如图 9 所示。可以看出，Pierce 振荡器由于采用的电源电压最大，输出摆幅也最大；交叉耦合振荡器单端输出摆幅接近 800 mV；环形振荡器由于电源电压最低，摆幅也最低。



(a) cross-coupled oscillator　(b) ring oscillator　(c) Pierce oscillator

Fig.9 Transient waveform
图 9 瞬态波形

相位噪声测试如图 10 所示，Pierce 振荡器、环形振荡器、交叉耦合振荡器在 1 MHz 频偏处的相位噪声分别为：−126 dBc/Hz, −111 dBc/Hz, −152 dBc/Hz。

表 1 比较了本文中的 3 种振荡器以及相关文献中的振荡电路，可以看出相位噪声和功耗始终是一对矛盾，特别是在谐振器件品质因子较低的情况下，品质因子将会极大地影响功耗。实际应用中需要综合考虑各种设计需求，

选取合适的振荡器结构。如用于大气压力检测时，测量精确度要求达到 0.1%，则应选择相位噪声较小的交叉耦合振荡结构。

表 1 几种振荡器的性能比较

Table1 Comparison of three oscillators

	ring oscillator	cross-coupled	pierce oscillator	[2]	[3]	[4]
oscillation frequency/GHz	1.150	1.150	1.150	0.864	1.000	1.750
static power loss/mW	0.382	4.320	26.300	4.000	—	9.900
phase noise/(dBc/Hz)	−111@1 MHz	−152@1 MHz	−126@1 MHz	−104@1 MHz	−60@1 MHz	−126 085@1 MHz
quality factor of resonance device	205.50	205.50	205.50	113.00	4.95	500.00

3 结论

本文比较了 3 种 FBAR 振荡器的原理和综合性能：传统的 Pierce 振荡器，针对本次使用的 FBAR 品质因子较低的情况，采用了三级 CMOS 反相器结构代替单管 Pierce，在保证相位噪声性能的情况下减小了功耗。在功耗为 26.3 mW 下取得了 −126 dBc/Hz@1 MHz 的相位噪声性能；环形振荡器的最大优点是在 FBAR 性能不足的情况下最大限度地减小功耗，但相对牺牲了一定的相位噪声，在相位噪声为−111 dBc/Hz@1MHz 的情况下仅有 0.382 mW 的功耗；本文提出的改进交叉耦合振荡器，能够解决 FBAR 带来的低频锁定问题，同时加入了高通环路，减小了低频噪声对相位噪声的影响，拥有−152 dBc/Hz@1 MHz 的相位噪声性能和 4.321 mW 的功耗，这种结构最满足大气压力高精确度的要求。

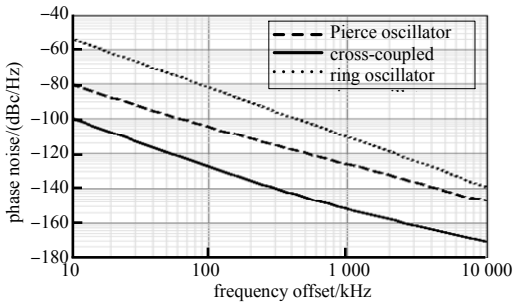


Fig.10 Phase noise of three oscillators

图 10 三种振荡器的相位噪声

参考文献：

[1] NAGARAJU M,GU J,LINGLEY A,et al. A fully integrated wafer-scale sub-mm^3 FBAR-based wireless mass sensor[C]// Frequency Control Symposium. Taipei,Taiwan,China:IEEE, 2016:1−5.

[2] WERNER D H,JIANG Z H. Ultra low-power MEMS-based radios for WBAN[M]. [S.l.]:Wiley−IEEE Press, 2016.

[3] JOHNSTON M L,KYMISSIS I,SHEPARD K L. FBAR-CMOS oscillator array for mass-sensing applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2010,10(6):1042−1047.

[4] WANG H. Magnetic sensors for diagnostic medicine:CMOS-based magnetic particle detectors for medical diagnosis applications[J]. IEEE Microwave Magazine, 2013,14(5):110−130.

[5] EDREES H M,COLN-BERRIOS A R,PEIXOTO D D G,et al. Monolithically integrated CMOS-SMR oscillator in 65 nm CMOS using custom MPW die-level fabrication process[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2017,26(4):846−858.

[6] URANGA A,SOBREVIELA G,MARIG E,et al. Above-IC 300 MHz AIN SAW oscillator[C]// International Conference on Solid-state Sensors. Kaohsiung. Taiwan,China:[s.n.], 2017:1927−1930.

[7] HAMZAH M H M,NORDIN A N,KARIM J. Low power and high voltage swing cascode Pierce oscillator for MEMS SAW resonators[C]// Proceedings of Design,Test,Integration & Packaging of MEMS/MOEMS. Budapest,Hungary:[s.n.], 2016:1−4.

[8] TA T T,ANDO K,TANIFUJI S,et al. 5 GHz band low phase noise Si-CMOS oscillator with flip-chip mounted FBAR[C]// Microwave Conference Proceedings. Yokohama,Japan:IEEE, 2010:1039−1042.

[9] RAHIM S A E A,ZHANG G,KAHO T,et al. Design of class-C FBAR-based oscillator for low power applications[C]// RF and Microwave Conference. Kuching,Malaysia:IEEE, 2016:7−10.

[10] KOO J,WANG K,RUBY R,et al. A 350 μW 2 GHz FBAR transformer coupled Colpitts oscillator with close-in phase noise reduction[C]// IEEE Custom Integrated Circuit Conference. Austin,TX,USA:IEEE, 2017:1−4.

[11] ZHANG M,DU L,FANG Z,et al. A sensitivity-enhanced film bulk acoustic resonator gas sensor with an oscillator circuit and its detection application[J]. Micromachines, 2017,8(1):25−35.

[12] ZHANG M,ZHAO Z,DU L,et al. A film bulk acoustic resonator-based high-performance pressure sensor integrated with temperature control system[J]. Journal of Micromechanics & Microengineering, 2017,27(4):45−54.

[13] CHEE Y H,NIKNEJAD A M,RABAEY J. A sub-100 μW 1.9 GHz CMOS oscillator using FBAR resonator[C]// Radio Frequency Integrated Circuits. Long Beach,CA,USA:IEEE, 2005:123−126.

(下转第 337 页)