

基于CMOS工艺的低功耗医疗传感器设计方法研究

赵旭杰

东北大学秦皇岛分校悉尼智能科技学院 河北 秦皇岛 066004

摘要: 随着医疗科技的不断进步,人们对于能够实时、精准、低功耗地监测患者生理参数的医疗传感器的需求日益增加,并且医疗传感器在实际应用中,常常需要长时间运行在工作状态,而传统的医疗传感器往往功耗较大,越来越不能满足长时间工作要求。可穿戴的医疗设备逐渐成为未来的发展趋势,基于CMOS工艺下的低功耗医疗传感器设计方法的研究,将为开发轻便、舒适、低功耗的可穿戴医疗设备提供创新的技术方案。

关键词: CMOS工艺;低功耗医疗传感器;设计研究

1 研究背景

1.1 研究背景及意义

纳米级互补金属氧化物半导体(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS)集成电路凭借其低功耗、高性能以及与其他技术兼容性好的优点,在微处理器、存储器、传感器等领域得到广泛应用。CMOS传感器不仅具备成本效益较低的特点,而且在提供卓越性能的同时,为医疗传感器的低功耗设计带来了可靠而高效的解决方案。因此,低功耗医疗传感器不仅是延长传感器使用寿命,为患者提供更为持久的医疗服务的关键,也是未来可穿戴医疗设备能否向大众普及的瓶颈。CMOS器件在医疗传感器中扮演着愈发重要的角色。随着医疗技术的不断进步,医疗领域对于能够实时、精准、低功耗地监测患者生理参数的医疗传感器的需求日益增加,医疗传感器在实际应用中常常需要长时间的监测,而传统的医疗传感器往往由于功耗较高无法满足这一需求。从上世纪90年代开始,人们尝试通过在CMOS工艺下设计低功耗医疗传感器,以此来达到显著延长传感器的使用寿命,提高其在长时间监测和患者监护中的可靠性和稳定性,为患者提供更为持久的医疗服务的目的。

1.2 研究进展

近年来,基于CMOS工艺下的低功耗医疗传感器设计方法的研究逐渐成为热点。为了提高传感器的能效比,2016年,Daniel A.Sanchez等人设计了一个基于并联电感同步开关技术的压电能量采集系统。结果表明,系统将有源整流器和并联电感同步开关技术相结合,减少整流损耗,大大提高整流效率。2021年Seneke Chamith Chandrarathna等人提出了一种自谐振升压转换器,用于实现高效收集超宽范围的光能。结果表明,该升压转换器在超宽的源采集范围内实现了大于90%的跟踪效率。在250mV的输入电压和20Ω的源电阻的情况下,系统峰

值端到端效率为86%。2023年,浙江大学林雨秋团队基于0.18μm CMOS工艺,设计了一个能够并行收集机械能和光能的多源微能量收集电源管理系统。结果表明,该系统不需要依赖外部电源,只要依靠机械能、光能就可以实现自启动、自供电,并且系统可以实现对机械能、光能的并行高效收集以及当工作环境中的光能或者机械能不再存在时,系统能自适应地切换能量收集模式,可实现单独收集机械能、光能。2020年,安徽理工大学张超等人针对传感器的能耗管理进行深入研究,提出一种低能耗多跳时间同步算法。研究结果表明,该算法有效减小了传感器的动态功耗,提高了传感器的能效和可靠性。然而,无论是机械能还是光能,从微小环境中获取的能量是非常小的,一般在几十到几百微瓦数量级,而传统的集成电路功耗都在毫瓦数量级以上,因此,该系统的实际工作效率不是很理想。同时,由于该算法的普适性有待有人提出了一种用于片上电容式检测微米级空气中可吸入颗粒物的集成CMOS单片传感器系统,其检测范围达到1-30μm粒径。Chiang等人介绍了一种用于人体暴露监测装置的高灵敏PM2.5粒子检测器,它由粉尘传感器和CMOS传感器组成。Rhee等人研究了一种基于激光二极管的PM1、PM2.5和PM10空载粒子探测器读出集成电路。它通过补偿光引起的偏移,扩大了检测器的动态范围。由于近来传感器的成本呈下降趋势,精度受到严重影响。因此,传感器采用了智能校准算法,以保持精度,同时降低传感器的总体成本。

然而,要在传感器系统上运行智能校准算法,需要在测量仪器上应用大量的测试数据。然而,这并不能从根本上解决PM传感器的精度问题。此外,该算法不能考察,并且算法对传感器的静态功耗影响甚微,而长时间工作的医疗传感器需要时刻维持状态,因此如何降低静态功耗也是一个难题。2015年,美国密歇根大学的

Dongmin Yoon等人提出一种新型晶体振荡器,利用延迟锁定环(Delay Locked Loop, DLL)精确生成的脉冲驱动来维持石英晶体的振荡,使用高压增强驱动,低压维持极小的振荡幅度,结果表明,这一工艺最终实现功耗为5.58 nW的晶体振荡器,然而DLL等脉冲控制电路也引入了较大的功率和面积。为了降低传感器的动态功耗,2023年,南京邮电大学李宜书^[3]等人根据晶体振荡器起振和停振情况下输出电压信号平均值的特性,提出了一种能够获得振荡器维持振荡状态所需的最小电流的方法,研究表明,两种不同的数字控制电路结构为晶体振荡器提供电流控制信号,大大降低了晶体振荡器电路的功耗。采用电阻对基准电流源进行温度补偿,降低了基准电流源的温度系数。但由于基准电流源中使用的电阻阻值较大,并且占据了较大面积,导致在工作过程中的温度系数随长时间工作不断升高,能耗也会随之升高,尽管通过减小CMOS管尺寸,降低了施密特触发器的动态功耗有一定的效果,且相较于算法在硬件上具有一定的普适性,但目前依旧没有一种可替代的电源门控技术满足当前医疗设备长时间工作状态下的能耗问题。

目前,常见的光散射粒子传感器应用于的低功耗医疗传感器的设计,大多基于粒子计数法和微控制器(MCU)系统,这往往会导致响应速度慢、高浓度检测精度低、集成度低和成本高等问题。当粒子计数算法在MCU系统上运行时,软件的复杂性会增加,开发周期也会延长。此外,在MCU系统上运行软件,控制过程的效率也不如基于ASIC芯片的控制过程。

1.3 研究内容

由于硅基跟踪系统具有卓越的分辨率、高辐射耐受性和读出速度,目前和设想中的所有高能物理探测器都依赖于硅基跟踪系统。采用CMOS工艺制造的传感器为当前的传感器技术提供了一个有趣的替代方案,因为它可以将有源探测层和读出电子器件整合到一个结构中。这种集成使传感器变得更薄,减少了颗粒必须通过的材料数量,而且像素传感器的像素尺寸可以很小,从而提高了颗粒度。然而,所研究的无源CMOS传感器滥用了用于生产CMOS集成电路的CMOS工艺,不包括任何读出电路。此外,CMOS工艺是工业标准工艺,允许以相当低的成本大量生产。不过,还需要评估无源CMOS工艺对条状传感器的适用性。即将进行的实验需要用硅传感器覆盖大面积区域,例如ATLAS内部跟踪器的面积就超过170平方米,因此传感器的尺寸必须超过市场上使用的网罩。这些掩膜包含单层传感器的图案,尺寸通常为1-4平方厘米。因此,较大的结构必须通过一种称为"拼接"的工艺来

实现。这种方法将传感器分成较小的区域,用特定的掩膜分别制作,然后将这些区域连接起来。与非缝合设备相比,价格大约增加了30%,但对于大批量生产来说,使用商业生产线的能力很可能使传感器的价格仍然低于其他同类传感器。本研究中的传感器由LFoundry生产,采用浮动区技术从电阻率为5kΩcm的晶片上切割下来。传感器采用150纳米工艺在p型基体上制造,标称厚度为(150±15)μm。在传感器变薄的背面植入一个+,然后再将植入传感器的背面。用激光对其进行退火处理,并在外部添加金属层。第一批传感器没有金属层,+层的掺杂浓度相对较低。研究对两种尺寸的传感器进行,这两种类型的传感器都宽1厘米,带长为2.1厘米或4.1厘米,分别称为短传感器和长传感器。

2 低功耗医疗传感器设计方法

2.1 设计方法

传感器分为三种设计,通过改变孔的掺杂浓度及其宽度来研究不同的耗尽概念。之所以选择阱,是因为在以前的单片式芯片研究中,阱的效果很好。与普通低剂量设计(见图1)有两种不同的孔植入宽度,分别为30μm和55μm。这两种设计在高剂量+区域和低剂量区域的植入宽度上有所不同。它们不是LFoundry的标准孔设计,植入设计是通过TCAD评估的。

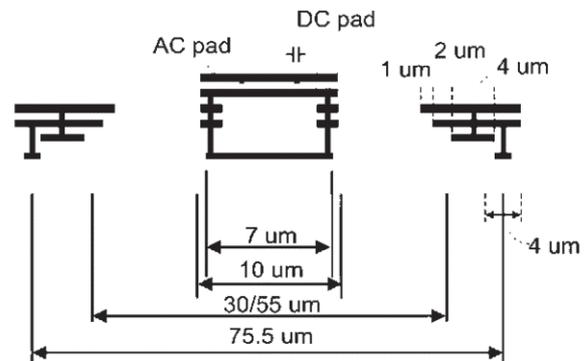


图1 植入带设计

2.2 计算模块

所采用的光度计方法可直接求解传感器颗粒组的散射光强度与颗粒质量浓度之间的线性关系,从而提高了测量的准确性和精确度。证明了设计传感器的响应速度,公式如下:

$$I(\theta) = N \frac{8\pi^4 d^6}{\lambda^4 r^2} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 (1 + \cos^2 \theta) I_0$$

$$C = \frac{8\pi^4}{\lambda^4 r^2} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 (1 + \cos^2 \theta) I_0$$

其中, $I(\theta)$ 为 θ 方向上的散射光强度, I_0 为入射光强度的初始值。 C 是颗粒直径, 而 m 是相对折射率。 λ 是入射光

线的波长。

3 低功耗医疗传感器的测试结果

3.1 TCAD模拟

为了更好地了解不同的几何形状，使用Synopsys Sentaurus进行了TCAD仿真（技术计算机辅助设计）。从条带中心到背板的垂直切割电场。由于条带设计不同，特别是植入物宽度不同，常规植入物在条带中心显示的电场高于低剂量植入物。图2显示了三种不同几何形状的短传感器的模拟CV曲线，并与常规和低剂量设计的一次测量结果进行了比较。由于两个低剂量植入体无法与偏置环分开测量，因此测量结果只区分了常规设计和低剂量设计。常规植入体产生的电容低于低剂量植入体的几何形状，这表明模拟和测量结果一致。模拟结果与实验数据之间的微小偏差是由于模拟所用掺杂曲线值的不确定性造成的。

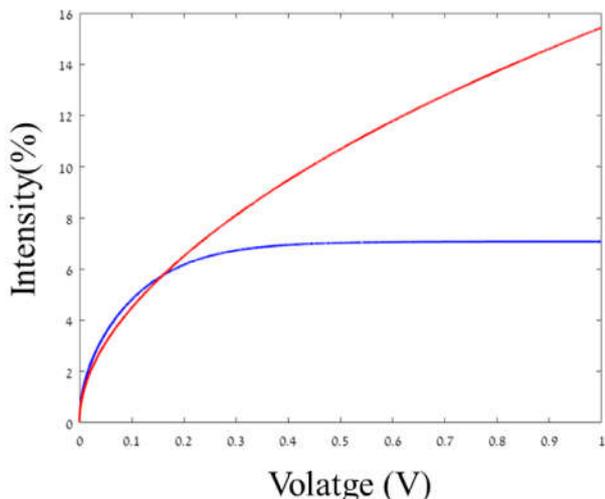


图2 探测器的CV特性和三种几何形状的模拟

3.2 传感器的电子光学性能

图3显示了在T0（弯曲过程之后，室温下，任何热应力测试之前）、HTSL100测试之后的电子光学特性分析结果。每次光电特性分析都是在室温下进行的。曲率半径为250毫米和150毫米的材料分别记为"10D"和"6D"。在这些测试条件下，我们可以说曲率对关键性能参数没有

任何影响。通过对大量样品进行更多测试，可以对研究结果进行微调。

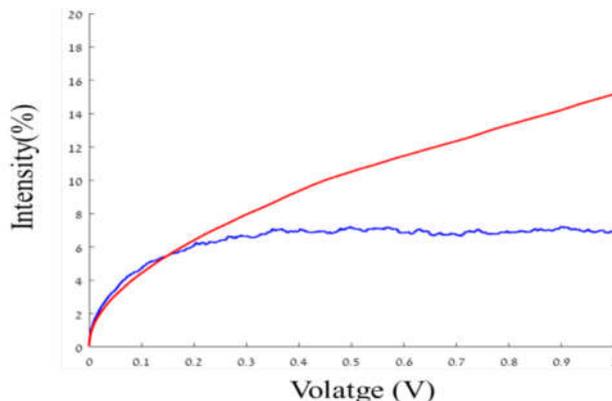


图3 电学性能测试

4 结论

本文通过无源CMOS技术生产的条形传感器进行了详细研究，设计了一种低功耗医疗传感器。这种传感器采用缝合方式连接多个网罩，从而形成长达4厘米的条形。结果表明，缝合式无源CMOS传感器能收集到预期的电荷量，而且整个传感器体积对电荷敏感。CMOS工艺对于未来需要用硅探测器覆盖大面积区域进行跟踪的实验来说，是一种很有前途、成本效益高的候选工艺，对医疗传感器的发展有极高的前景。

参考文献

- [1]林雨秋.应用于物联网设备的超低功耗多源微能量收集电源管理芯片设计[D].浙江大学,2023.
- [2]张超,黄友锐,陈珍萍.一种低能耗多跳无线传感器网络时间同步算法[J].计算机应用与软件,2020,37(05):102-107.
- [3]李宜书.一种超低功耗RTC电路的研究与设计[D].南京邮电大学,2023.
- [4]高性能SOI基纳米硅薄膜微压阻式压力传感器的研究[J].高颖;姜岩峰.传感技术学报,2023(06).
- [5]介质隔离高精度MEMS谐振式压力传感器[J].李传昊;王军波;商艳龙;谢波;张玉萍.仪器仪表学报,2023(04).