

一种低功耗高动态范围的 915MHz 无源射频标签*

白蓉蓉[†] 李永明 张 春 王志华

(清华大学微电子学研究所, 北京 100084)

摘要: 设计了一种适用于 NCITS-256-1999 协议的 915MHz 无源射频只读标签. 芯片具有低功耗、高动态范围的特点. 1.6V 电源电压下模拟前端的静态工作电流为 1.6 μ A, 芯片正常工作所需要的最小射频信号输入功率为 45 μ W. 芯片在 0.18 μ m CMOS 工艺下流片验证, 测试结果表明, 芯片能够很好地满足设计要求.

关键词: RFID; 无源标签; 低功耗; 高动态范围

EEACC: 2570D

中图分类号: TN402

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)08-1316-04

1 引言

无线射频识别(RFID)技术, 是利用无线射频方式在读卡器和射频标签之间进行非接触双向数据传输, 以达到目标识别和数据交换的目的. 工作于 125kHz 和 13.56MHz 等低频频段的标签设计技术已趋于成熟, 目前国内外的研究热点主要集中在超高频(UHF)频段和微波频段的无源标签设计以及微波频段的片上天线设计等方面, 国内尚未见到有关 UHF 及微波频段完整标签设计和测试的报道. 对于无源 RFID 标签来说, 其最重要的参数就是工作距离, 而提高工作距离的主要途径在于降低芯片功耗和电源电压. 当标签位于读卡器场区的不同位置时, 输入功率的变化范围可达几十 dB, 因此芯片还必须能够处理动态范围很大的信号. 这些都是无源标签设计中的关键问题, 也是当前研究的热点问题.

本文提出了一种与 NCITS-256-1999 协议兼容的 915MHz 无源射频只读标签, 通过对射频前端电源电路和解调电路在器件、电路结构等方面的优化, 降低芯片功耗并扩大芯片工作动态范围. 文中给出了完整芯片的仿真和测试结果.

2 系统结构

标签主要由电源恢复电路、解调电路、调制电路、时钟电路、复位电路、偏置电路、数字电路等部分组成. 电源恢复电路从电磁场中恢复出直流电压, 为芯片供电; 解调电路将读卡器发送给标签的射频信号转化为数字基带信号; 调制电路通过改变从标签

天线端看进去的芯片输入阻抗, 达到反向散射调制的目的; 时钟电路为数字电路提供时钟信号; 复位电路在电源电压上升到可以工作的幅度时产生复位信号, 强制数字电路进入一个已知状态; 偏置电路为模拟前端各模块提供偏置电流; 数字电路负责处理基带信号, 进行指令译码, 并向读卡器返回标签所存储的信息等.

3 各电路模块的设计

3.1 电源恢复电路及调制电路

电源恢复电路的结构如图 1(a)所示. 当标签离读卡器较远时, 标签接收到的射频信号很微弱, 只有几百毫伏. 为了在远距离下获得合理的工作电压, 电源恢复电路采用了 9 级 Dickson 倍压电路的形式. 在不考虑寄生效应的情况下, N 级 Dickson 倍压电路所能获得的电源电压为^[1]:

$$V_{DD} = 2N(V_{p,RF} - V_{f,D}) \quad (1)$$

式中 N 是倍压电路的级数; $V_{p,RF}$ 是输入射频信号的幅度; $V_{f,D}$ 是构成倍压电路的二极管上的正向压降. 为提高倍压效率, 即在相同的射频输入信号幅度下获得更高的电源电压, 需要减小 $V_{f,D}$. 肖特基二极管由于具有较低的阈值电压, 一般被使用在标签的电源电路中^[1]. 但标准 CMOS 工艺下不提供肖特基二极管. 为了与标准 CMOS 工艺兼容, 在该电源恢复电路中采用了零阈值管和低阈值管. 前 6 级使用栅漏短接的零阈值 nMOS 管, 因为它的阈值电压在衬偏为零的情况下只有 0.05V 左右. 考虑到随着电路级数的增加, 零阈值 nMOS 管源极的直流电压越来越高, 衬偏效应越来越显著, 使得其阈值显著增

* 国家自然科学基金资助项目(批准号:60475018,90407006)

[†] 通信作者. Email: brr05@mails.tsinghua.edu.cn

2007-02-01 收到, 2007-03-22 定稿

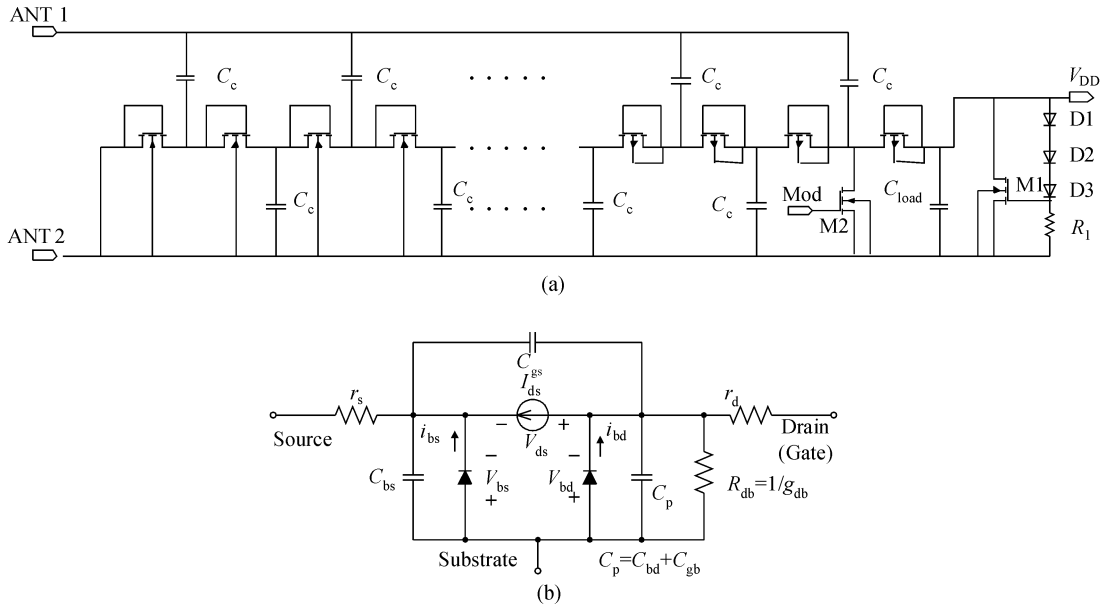


图 1 (a) 电源恢复电路和调制电路; (b) 栅漏短接的 MOS 管的大信号等效电路
 Fig. 1 (a) Rectifier and modulator; (b) Large signal equivalent circuit of diode-connected MOSFET

加, 因此后 3 级改用低阈值 pMOS 管. 这里对 pMOS 管的衬底接法作了改进, 普通二极管接法的 pMOS 管其衬底是与源极相连的, 而这里将衬底与栅(漏)极接在一起, 这对于提高倍压电路的效率有如下好处: 当射频信号通过 pMOS 管向电容充电时, 管子的漏极电压低于源极电压, 衬底与漏极相连使得衬偏电压为负, 从而等效阈值电压降低, $V_{f,d}$ 减小; 另外, 在考虑 MOS 管的寄生电容时, (1) 式可以改写为^[2]:

$$V_{DD} = 2N(C_c V_{p,RF} / (C_c + C_{para}) - V_{f,D}) \quad (2)$$

$$C_{para} = C_{bs} + C_{bd} + C_{gb} \quad (3)$$

式中 C_{bs}, C_{bd}, C_{gb} 是 MOS 管的大信号寄生电容, 如图 1(b) 所示^[3]. 当衬底与栅极短接时, 图 1(b) 中的 C_{bd} 和 C_{gb} 都被消除, 大大减小了寄生电容, 提高了倍压效率. 仿真结果表明, 当电源负载为 $5\mu A$ 时, 获得 1.6V 电源电压所需要的射频信号最小输入幅度为 230mV, 对应的射频输入功率为 $36\mu W$.

当芯片位于读卡器场区的不同位置时, 射频信号的输入功率变化范围很大. 为保证标签具有较大的工作范围, 需要在近场的情况下, 使用稳压电路降低芯片输入阻抗, 减小标签实际获得的功率, 同时将恢复出的电源电压限制在合理的范围内. 稳压电路由图 1(a) 中的 M1, D1, D2, D3 和 R_1 构成. 当电源电压上升到超过 3 个二极管的阈值电压时, 电阻 R_1 上的压降开始增大, 使得泄流管 M1 导通, 泄放大电流以减小芯片输入阻抗. 仿真结果显示, 电源电压为 1.6V 时, 稳压电路消耗的静态电流为 230nA; 当射频信号输入功率小于 7.5mW 时, 电源电压小于 2.35V.

UHF 频段的射频标签, 采用反向散射调制的方式向读卡器返回信号. 根据 NCITS-256-1999 协议^[4], 反向链路的调制方式是 ASK. 这里通过 nMOS 管 M2 的导通和关断来改变芯片的输入阻抗, 达到调制的目的, 如图 1(a) 所示. 如果像文献 [5] 中所述将 M2 直接接在 ANT1 和 ANT2 之间, 则芯片输入阻抗的变化最大, 可以获得最大的调制深度, 但是存在如下问题: 在不调制期间, 每当射频信号的负半周到来时, 即 $V_{ANT1} < V_{ANT2}$ 时, M2 漏极和衬底之间的 pn 结可能发生正偏, 带来衬底漏电, 降低了倍压电路的功率效率. 通过将 M2 改放在如图 1(a) 所示的位置, 可以克服这个问题. 因为在电路达到稳态时, M2 的漏极电压对地有接近于 V_{DD} 的直流分量, 即使信号的负半周到来, 只要其幅度小于 V_{DD} , 那么 M2 的漏衬 pn 结就不会发生正偏. 当处于调制状态时, M2 导通, 相当于将倍压电路中位于 M2 之前的 17 个二极管接法的 MOS 管都对地短路, 从而获得较高的调制深度, 增大了工作距离. M2 没有直接接在 C_{load} 的两端是为了减小 M2 放电对于电源电压的影响.

3.2 解调电路

在 NCITS-256-1999 协议中, 读卡器向标签发送的信号, 采用的是 OOK 调制方式, 信号的波形如图 2(a) 所示. 图 2(b) 给出了解调电路的结构框图, 包括包络检波电路、参考电压产生电路和迟滞比较器三部分.

包络检波电路的主体是 2 级 Dickson 倍压结构. 除了提取信号包络外, 电路还对远场下的微弱信

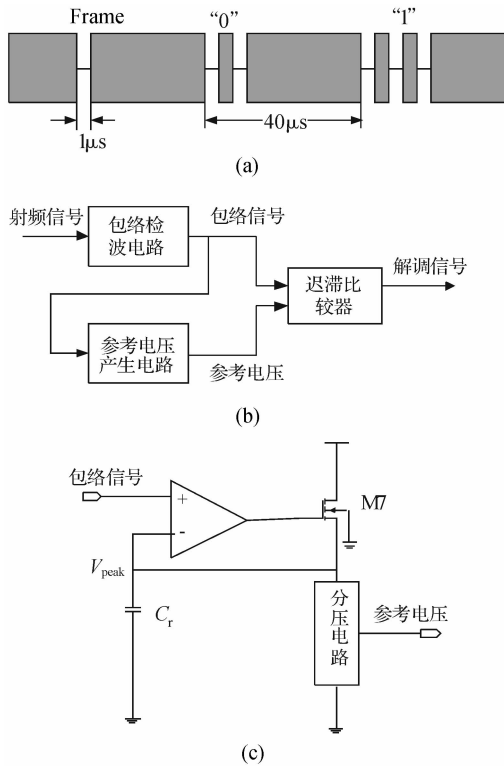


图 2 (a) 读卡器到标签的信号波形; (b) 解调电路结构框图; (c) 参考电压产生电路
Fig.2 (a) Waveform of forward-link signals; (b) Block diagram of the demodulator; (c) Reference voltage generator

号进行放大, 对近场下的强输入信号进行限幅, 从而提高芯片工作的动态范围.

参考电压产生电路的结构如图 2(c) 所示. 当标签位于场区的不同位置时, 输入信号的幅度差别很大, 这里将自动增益控制中常用的峰值检测技术应用于 RFID 标签, 使得参考电压不是一个固定值, 而是能够跟随信号强弱的变化而有效地提高动态范围和检测灵敏度. 图中的运放和 nMOS 管 M7 构成峰值检测电路, 当标签进入读卡器的场区时, 结点 V_{peak} 的初始电压低于包络信号, 运放输出电平为高, M7 处于导通状态, 对电容 C_r 充电, 直到 V_{peak} 的电压上升到与包络信号的幅度相同为止, 此后 M7 关断; 当长度为 $1\mu\text{s}$ 的 OOK 信号的下脉冲到来时, 包络信号跟随射频信号下降, 但由于分压电路的等效电阻与电容 C_r 所决定的时间常数远大于 $1\mu\text{s}$, 所以 V_{peak} 点的电压保持包络信号的峰值不变. 分压电路产生幅度约为 $V_{\text{peak}}/2$ 的参考电压, 用于比较器的判决. 分压电路一般由电阻网络构成, 为了减小漏电, 需要很大的阻值, 面积效率很低. 而本设计中采用 4 个二极管接法的 MOS 管代替电阻构成分压电路, 大大节省了面积, 并且选取较小的宽长比, 可

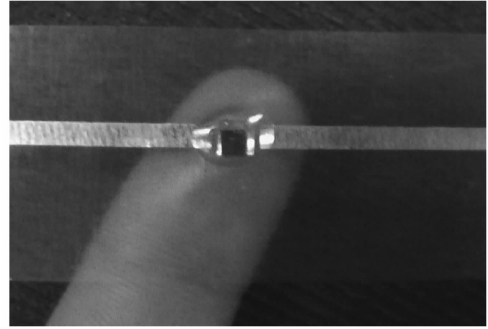


图 3 封装在偶极子天线上的标签
Fig.3 Tag with dipole antenna

以降低分压电路的漏电流对于 V_{peak} 的影响. 仿真结果显示, 解调电路在 1.6V 电源电压下的静态功耗为 $0.9\mu\text{W}$, 最小可检测的射频信号幅度小于 150mV .

3.3 其他电路模块

时钟电路从解调信号中提取出两路时钟信号 CLK1 和 CLK2, 用以控制数字部分的运行. 时钟电路的具体结构在文献[6]中有详细论述. 由于电路的主体是一系列基于反相器和电容的延时单元, 因此不存在静态功耗. 通过选取小尺寸的反相器和控制延时单元的充放电电流, 可以降低动态功耗. 偏置电路采用了自偏置 V_t 参考源^[7], 它所提供的电流不随电源电压而变化, 电流源本身的静态电流控制在 200nA 以下. 上电复位电路在电源电压上升到 1.6V 左右时对数字电路进行复位. 其静态功耗为 $0.2\mu\text{W}$. 数字部分根据 NCITS-256-1999 协议设计, 实现了读标签 ID 号、防碰撞等功能.

4 仿真与测试结果

仿真结果表明, 在 1.6V 电源电压下, 整个模拟前端的静态工作电流为 $1.6\mu\text{A}$, 芯片正常工作所需的最小射频信号输入功率为 $45\mu\text{W}$, 在读卡器发射功率为 4W EIRP, 标签天线增益为 0dBi 的情况下, 对应的工作距离为 7.8m .

完整芯片在 $0.18\mu\text{m}$ CMOS 工艺下流片验证. 芯片面积为 $0.91\text{mm} \times 0.87\text{mm}$. 封装在 $\lambda/2$ 偶极子天线上的标签如图 3 所示. 完整芯片采用 915MHz 、与 NCITS-256-1999 协议兼容的读卡器进行了测试. 测试结果表明, 芯片各部分均正常工作, 且满足设计要求. 图 4 所示的测试波形分别为射频输入信号、标签解调信号和 CLK1 信号、CLK1 和 CLK2 信号、读卡器检测到的反向散射信号. 为减小示波器探头电容对于测试信号的影响, 测试时均采用探头的 $\times 10$ 衰减档, 因此实际信号幅值是图中波形所示幅值的 10 倍.

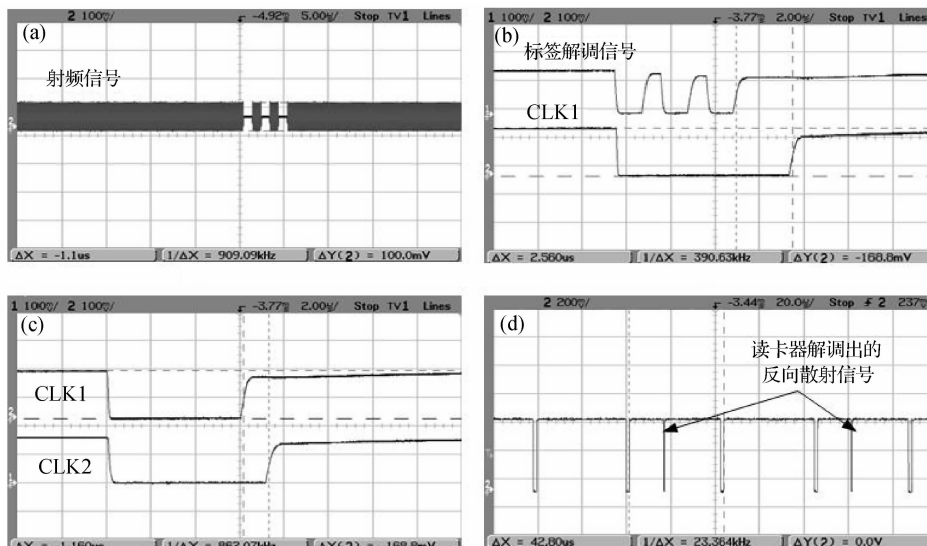


图 4 (a) 射频输入信号; (b) 标签解调信号和 CLK1 信号; (c) CLK1 和 CLK2 信号; (d) 读卡器解调信号

Fig. 4 (a) RF input signal; (b) CLK1 and base-band signal demodulated by tag; (c) CLK1 and CLK2 signals; (d) Back-scattered signal demodulated by reader

5 结论

本文在 0.18 μm CMOS 工艺下实现了一种基于 NCITS-256-1999 协议的 915MHz 无源射频只读标签. 芯片具有低功耗、大动态范围的特点. 测试结果表明, 各模块电路的实际工作性能均满足设计要求.

参考文献

- [1] Karthaus U, Fischer M. Fully integrated passive UHF RFID transponder IC with 16.7- μW minimum RF input power. *IEEE J Solid-State Circuits*, 2003, 38(10):1602
- [2] Dickson J. On-chip high-voltage generation in nMOS integrated circuits using an improved voltage multiplier technique. *IEEE J Solid-State Circuits*, 1976, 11(6):374

- [3] Cao Peidong. Foundations of microelectronics technology, bipolar and field-effect transistors. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001:276 (in Chinese) [曹培栋. 电子技术基础-双极、场效应晶体管原理. 北京: 电子工业出版社, 2001:276]
- [4] American National Standard of Accredited Standards Committee NCITS, NCITS 256-1999
- [5] Curty J P, Joehl N, Dehollain C, et al. Remotely powered addressable UHF RFID integrated system. *IEEE J Solid-State Circuits*, 2005, 40(11):2193
- [6] Zhang Li, Wang Zhenhua, Li Yongming, et al. Clock generator and OOK modulator for RFID application. *Journal of Zhejiang University*, 2005, 6A(10):1051
- [7] Gray P R, Hurst P J, Lewis S H, et al. Analysis and design of analog integrated circuits. Beijing: Higher Education Press, 2003:311

A Low Power, Large Dynamic Range 915MHz Passive RFID Tag*

Bai Rongrong[†], Li Yongming, Zhang Chun, and Wang Zhihua

(Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A 915MHz passive read-only radio frequency identification (RFID) tag compatible with NCITS-256-1999 is presented. This tag has the advantages of low power and large dynamic range. The static current consumption of the analog front-end is 1.6 μA under a 1.6V power supply. The minimum RF input power that makes the chip work properly is about 45 μW . The tag has been implemented in 0.18 μm CMOS technology. Measurement results show that the chip can satisfy the design target well.

Key words: RFID; passive tag; low power; large dynamic range

EEACC: 2570D

Article ID: 0253-4177(2007)08-1316-04

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 60475018, 90407006)

[†] Corresponding author. Email: brr05@mails.tsinghua.edu.cn

Received 1 February 2007, revised manuscript received 22 March 2007