

一种低压高效的电荷泵设计

魏 哨 静¹, 梅 年 松², 张 钊 锋², 闵 嘉 华¹

(1 上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200072; 2 中国科学院 上海高等研究院, 上海 201203)

摘 要: 针对于传统电荷泵结构存在的阈值压降和受体效应影响的问题, 在传统四相时钟电荷泵结构基础上通过增加衬底自举电容及辅助管增大传输管的衬底电压, 降低体效应的影响, 提升了电荷泵电路的转换效率, 降低了电荷泵电路的启动电压. 电荷泵电路基于 TSMC 0.18 μm CMOS 工艺进行设计与仿真, 仿真结果表明: 改进型电荷泵的工作电压可以低至 0.8 V, 转换效率 76.25%.

关键词: 电荷泵; 体效应; 转换效率; 低电压

中图分类号: TN4

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2017)10—0072—04

A High Efficiency and Low Voltage Charge Pump Design

WEI Shao-jing¹, MEI Nian-song², ZHANG Zhao-feng², MIN Jia-hua¹

(1 College of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2 Shanghai Advanced Research Institute, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203, China)

Abstract: In view of the traditional charge pump threshold loss and body effect, a modification of four phase clock charge pump is proposed, which adds the substrate bootstrap capacitance and the auxiliary transistor to increase the body voltage. And then it reduces the body effect. Therefore, the conversion ratio is promoted, while the starting voltage of the charge pump circuit is reduced. THEN, THE CHARGE PUMP CIRCUIT IS DESIGNED AND SIMULATED BASED ON THE PROCESS OF TSMC 0.18 μm CMOS. The simulation results show that the improved charge pump can work in voltage of 0.8 V, the conversion ratio is 76.25%.

Key words: charge pump; body effect; conversion efficiency; low voltage

1 引言

近年来,随着无源射频识别(RFID)技术的应用深入,对于标签的识别距离要求越来越高,而标签芯片的功耗是影响电子标签阅读距离的最主要因素^[1],因此要求标签芯片的功耗越来越低. 存储器作为 RFID 标签存储信息的载体,是 RFID 标签芯片必不可少的核心电路之一,它的读写功耗是标签芯片功耗的主要来源. 相较于其他类型存储器,EEPROM 型存储器具有功耗低、价格便宜等优点,是 RFID 存储电路通常采用的存储器. 但 EEPROM 电路在擦写信息时需要较高的电压(15 V),为了在低电压下对 EEPROM 存储器进行擦写,电荷泵电路是必不可少的单元. 电荷泵电路是一种基于电容能

够积累电荷的特性来产生高于电源电压的输出的电路. 存储器中电荷泵的功耗是其功耗的主要组成部分,降低电荷泵的功耗能够有效地降低整个存储器的功耗. 因此设计能工作在低电源电压且具有高转换效率的电荷泵电路对于降低存储器的功耗具有非常重要的意义.

1976 年, Dickson^[2] 提出了图 1 所示的由二极管和电容组成的升压结构,利用二极管和电容的特性,将电荷一级级输送至输出端,得到几倍于输入电压的输出电压. 通常采用二极管连接的 NMOS 管来代替二极管^[3],但是由于 NMOS 管存在额外的阈值压降且受到体效应的影响,使得电路最终的输出电压趋于稳定而不再随升压级数的增加而增加,限制了电路的电压增益和转换效率.

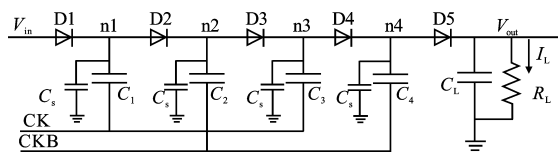


图1 传统 Dickson 电荷泵电路

之后的多数电荷泵基本是对 Dickson 电荷泵结构的改进和优化,比较常用的结构有 Wu 等人提出的 CTS 结构^[4]、图 2 所示的四相时钟结构^[5]、基于倍压器的结构^[6]、交叉耦合结构^[7]等,或者是不同结构的组合形式^[8],其中,四相时钟结构的传输管的栅极通过自举电容使其栅压升高,保证了传输管的彻底导通和关断,而其衬底通常是悬空或者接衬底偏置电路^[9]。本文基于四相时钟电荷泵结构,对电路传输管的衬底的连接方式进行了改进,提高了电路的电压增益和转换效率。

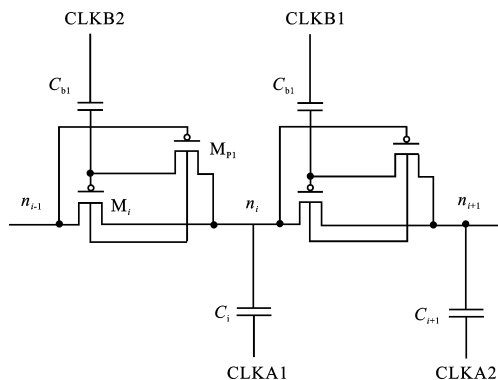


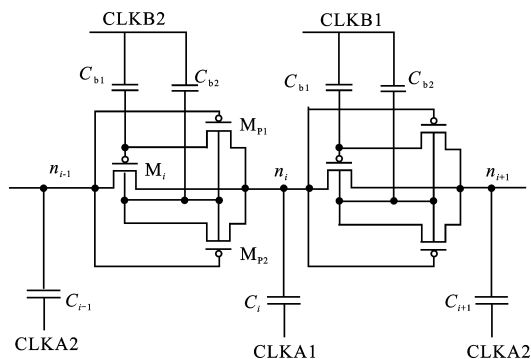
图2 四相时钟电荷泵结构

2 改进的电荷泵电路

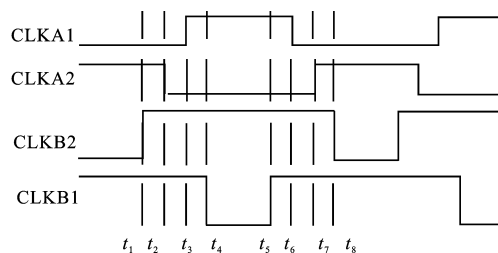
改进的电荷泵电路结构如图 3(a)所示,与传统四相时钟电荷泵结构不同的是:改进型电荷泵电路的传输管的衬底增加了自举电容连接,使衬底电压一直处于较高的电压状态;同时增加了与传输管衬底相连的辅助管,它与传输管栅极所连的辅助管完全对称,也保证了传输管的衬底电压一直处于较高电位。

图 3(b)所示为电荷泵电路工作所需的四相时钟波形,其中 CLKB1、CLKB2 的时钟幅度约为 $2V_{DD}$,而 CLKA1、CLKA2 的时钟幅度为 V_{DD} 。CLKA1、CLKA2 主要是作为升压电容 C 的驱动时钟,使电荷积累并向后级传输;CLKB1、CLKB2 主要是用来提高传输管栅极和衬底的电压,从而提高电荷的传输效率。

图 3(a)改进的电荷泵电路的具体工作过程



(a)改进的电荷泵结构



(b)四相时钟波形

图3 改进的电荷泵结构及其时钟

如下。

$0 \sim t_1$ 时间内,CLKA2 为 V_{DD} ,CLKA1 为 0,CLKB1 为约 $2V_{DD}$,CLKB2 为 0, M_i 管导通,电容 C_{i-1} 中电荷与 C_i 中电荷共享,抬高 n_i 节点的电压;由于 n_{i-1} 节点电压较高,则 M_{p1} 管和 M_{p2} 管截止。

$t_4 \sim t_5$ 时间内,CLKA2 为 0,CLKA1 为 V_{DD} ,CLKB1 为 0,CLKB2 约为 $2V_{DD}$, M_i 管截止, M_{p1} 管和 M_{p2} 管导通,则 M_i 管栅极电压、 n_i 节点电压和 M 管衬底电压互相连通而相等,且电容 C_b 与 C_i 电荷共享,能进一步抬高 n_i 节点的电压。

$t_1 \sim t_4$ 时间内,CLKB1 与 CLKB2 均约为 $2V_{DD}$, M_i 管截止,当 CLKA2 为 0 时, M_{p1} 管和 M_{p2} 管导通,此时, M_i 管栅极处 C_{b1} 上电荷与 C_i 电容上电荷共享,进一步提高 n_i 节点电压,同时 n_i 节点与 M_i 管衬底连通,保证衬底电压为最高电压。

随着级数的增加,CLKB2 和 CLKB1 的电压幅值会低于节点电压,可能不能使 M_i 管截止,但由于存在类似 M_{p1} 管的导通,使得 C_i 电容与 M_i 管栅极的 C_b 电容电荷共享,能保证 M_i 管的完全关断。

$t_5 \sim t_8$ 时间内电荷泵电路的工作过程与 $t_4 \sim t_1$ 时间内的的工作类似,不再赘述。

传统电荷泵电路中二极管连接的传输管一直处于饱和导通状态,因而存在阈值压降;而图 3(a)中电路稳态时能保证传输管处于线性导通的状态,管

子的阈值损失几乎为 0;在考虑负载电流时,传输管只存在较小的导通压降,因此电路的电压增益较大,电荷泵电路每一级的电压增量可由下式表示:

$$\Delta V = \frac{C}{C + C_s} V_{DD} - \frac{I_L}{f(C + C_s)} - I_L \cdot R_{on}$$

总输出电压为

$$V_{out} = V_{DD} + N \cdot \Delta V.$$

通常处于线性工作区的 MOS 管的导通电阻很小,所以电荷泵电路每一级都具有较大的电压增量,最终可得到较高的输出电压,同时电路的电压转换效率也较高. 另外传输管的衬底电压基本上一直保持较高的电位,电路受到的体效应的影响很小.

3 仿真验证结果

本文基于 TSMC 0.18 μm CMOS 工艺对电荷泵电路进行设计与仿真. 图 4 为 4 级改进型电荷泵与传统四相时钟电荷泵结构的输出电压随输入电压的变化.

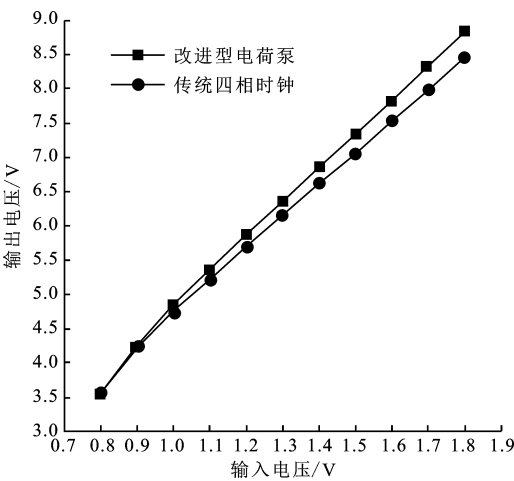


图 4 两种电荷泵输出电压随输入电压的变化

由图 4 可知,当输入电压大于 1 V 时,传统四相时钟结构与改进型电荷泵的输出电压的差值越来越大. 在纯电容负载的情况下,当输入电压为 1 V 时,4 级改进型电荷泵结构得到输出电压为 4.85 V,当输入电压 $V_{in} \geq 1$ V 时,改进型电荷泵的电电压增益均大于 4.8.

当输入电压为 1.8 V 时,比较改进型电荷泵结构与文献[10-11]中电荷泵结构的输出电压随升压级数的变化关系,如图 5 所示,三个电荷泵结构电路总的升压电容和主要传输管的尺寸相等,由图 5 可以看出,改进型电荷泵结构具有更高的输出电压和升压效率.

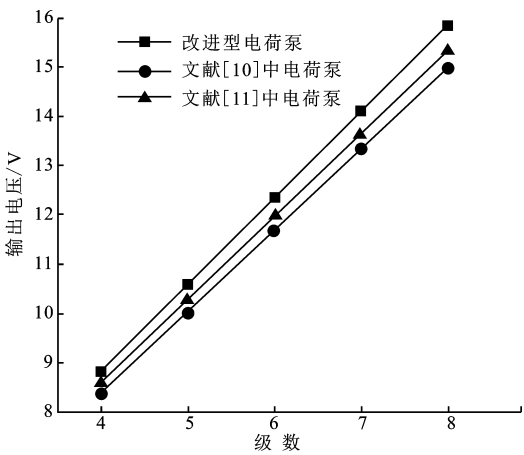


图 5 输出电压随级数的变化

图 6 比较了改进型电荷泵结构与文献[10-11]中电荷泵结构的输出电压随输入电压的变化关系,由图 6 可知,后仿真情况下,改进型电荷泵可以工作在低至 0.8 V 的电源电压下,而文献[10-11]中电荷泵在输入电压 $V_{in} \geq 1$ V 时才正常升压.

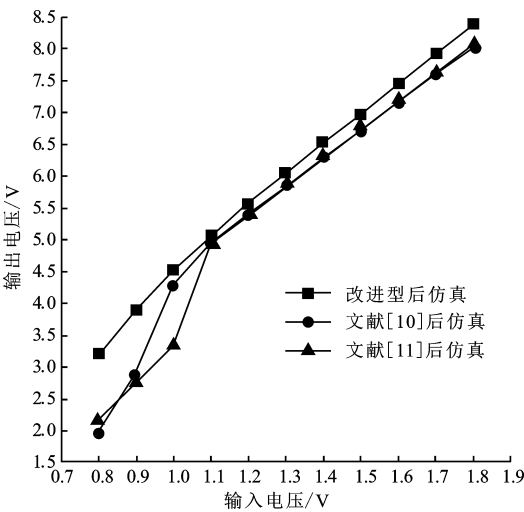


图 6 三种电荷泵结构后仿真结果

电荷泵的电电压增益可表示为

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

电荷泵的效率表达式为

$$\eta = \frac{V_{out} \cdot I_L}{V_{DD} \cdot I_{power}}$$

图 7 为 1.8 V 工作电压下,改进型电荷泵的输出电压及效率与负载电流的关系,图中显示,当负载电流为 7.82 μA 左右时,电荷泵具有最大的功率效率 76.25%.

本文改进型电荷泵与文献[12-13]中电荷泵的性能比较如表 1 所示. 结合图 6 可以看出,本文改进

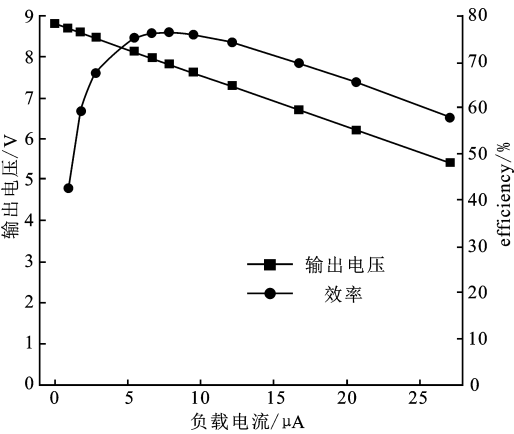


图 7 输出电压、效率与负载电流的关系

型电荷泵电路具有较高的电压转换效率、功率效率也相对较高,且可以工作在电压低至 0.8 V 的情况下,相对其他电路来说,各项性能指标良好.

表 1 本文电荷泵与其他文献中电荷泵的比较

参 数	文献[12]	文献[13]	本文
工艺/ μm	0.35	0.18	0.18
级数	4	4	4
泵电容/pF	—	4	4×0.951
负载电容/pF	—	20	20
频率/Mz	1	10	10
输入电压/V	1.8	1.8	1.8
输出电压/V	8.2	8.78	8.93
转换效率/%	91.1	97.5	99.2
功率效率/%	62	70.18	76.25
数据类型	测试	仿真	仿真

4 结束语

本文在传统四相时钟电荷泵结构基础上通过增加衬底自举电容及辅助管增大传输管的衬底电压,降低体效应的影响,提升了电荷泵电路的转换效率,降低了电荷泵电路的启动电压. 该结构电荷泵相比于传统的电荷泵电路,减小了体效应的影响,消除了阈值压降的问题,提高了电路的转换效率和电压增益,且该电路可以工作在更低的电源电压条件下,更适合于低电压应用.

参考文献:

[1] 闫娜. 低功耗低成本无源射频识别标签芯片的研究与设计[D]. 上海:复旦大学;2007.

[2] Dickson J F. On-chip high voltage generation in MNOS integrated circuits using an improved voltage Multiplier technique[J]. IEEE J Solid- State Circuits, 1976, 11 (3): 374-378.

[3] Duane HOTO, Vinod KDHAM, Keith HGUDGER, et al. High-Voltage regulation and process considerations for high-density 5V-only E2PROM'S[J]. IEEE J Solid State Circuits, 1983, 18(5):532-538.

[4] Wu J T , Chang K L . MOS charge pumps for low-voltage operation [J]. IEEE J Solid-State Circuits, 1998, 33(4):592-597 .

[5] Umezawa A , Atsumi S , Kuriyama M , et al. A 5-V-only operation 0.6-um Flash EEPROM with row decoder scheme in triple-well structure[J]. IEEE J Solid-State Circuits, 1992, 27(11):1540-1546.

[6] Moisiadis Y, Bouras I, Arapoyanni A. A CMOS charge pump for low voltage operation[C]//ISCAS . Geneva, Switzerland, 2000:577-580.

[7] HsuChien-Pin , Lin Hongchin . Analytical models of output voltages and power efficiencies for multistage charge pumps[J]. IEEE Transactions on power electronics, 2010, 25(6):1375-1385.

[8] Anna Richelli, Luca Mensi, Pier Luigi Rolandi, et al. A 1.2V-5V high efficiency CMOS charge pump for Non-Volatile Memories[C] // IEEE ISCS 2007 New York , 2007:2411-2414.

[9] Yan N , Min H, Zhao D, et al. An ultra-low-power embedded EEPROM for passive RFID tags [J]. J Semicond, 2006, 27(6):994-998 .

[10] 张炎峰,姜伟,胡玉青,等. 新型低压四相位高效率电荷泵电路[J]. 电子设计工程, 2016, 24(5):148-151.

[11] 李卿,周健军. 一种完全消除阈值电压损失的低纹波高效电荷泵[J]. 微电子学与计算机, 2015, 32(4): 86-89.

[12] Hwang Y S, D S Wu, H C Lin, et al. A new inverter based charge pump circuit with high conversion ratio and high power efficiency [J]. J Microelectronics, 2011, 42:982-987.

[13] 姜凯,张瑛. 一种高增益交叉耦合电荷泵的设计[J]. 微电子学, 2015, 45(5):599-601.

作者简介:

魏哨静 女, (1990-), 硕士研究生. 研究方向为模拟集成电路设计. E-mail: wshj2569@163. com.

梅年松 男, (1976-), 副研究员. 研究方向为模拟射频集成电路设计.

张钊锋 男, (1972-), 研究员, 博士生导师. 研究方向为物联网核心芯片、车联网关键技术等.

闵嘉华 男, (1961-), 教授, 博士生导师. 研究领域为半导体材料与器件、半导体材料性能测试、太阳能电池等.