

一种完全消除阈值电压损失的低纹波高效电荷泵

李 卿, 周健军

(上海交通大学 微电子学院, 上海 200240)

摘 要: 提出了一种新型全 PMOS 四相时钟电荷泵结构. 双支路交叉型的输出级消除了阈值电压的损失, 降低了输出电压纹波, 同时辅助晶体管的栅极采用互补支路的节点动态偏置. 采用新的时钟驱动策略, 消除了栅极连接的辅助电容反复充放电的影响, 进而提升了电荷泵输出效率. 最后在 TSMC 0.18 μm 工艺下, 对电路进行了仿真验证.

关键词: 四相时钟; 交叉型; 低纹波; 电荷泵

中图分类号: TN432

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2015)04-0086-04

A High-Efficiency Low-Ripple Charge Pump without Threshold Loss

LI Qing, ZHOU Jian-jun

(School of Microelectronics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In this paper, a new all-PMOS four-phase charge pump is proposed. Cross-coupled output stage eliminates the threshold loss and reduces the output ripple. The grids of supplementary crystals adopt the dynamic gate bias from complementary branch node, and new clock scheme, and with dynamic gate bias from complementary branch node and new clock scheme, auxiliary capacitance avoids charging and discharging in each cycle's deadtime, which improves output efficiency. Simulation result in TSMC 0.18 μm process has been given out in the end.

Key words: four-phase clock; cross-coupled; low ripple; charge pump

1 引言

电荷泵被广泛应用于电源管理、非易失性存储器、开关电容电路、LED 驱动电路中^[1], 可以为电路提供远高于电源的电压, 以满足低功耗、低电源电压电路中的特殊需求, 如非易失性存储器中的编程和擦除^[2]. 衡量电荷泵性能的关键指标之一是输出效率, 高效率的电荷泵能为电路提供更高更稳定的电压. 在最早的 Dickson 电荷泵结构中, 由于阈值电压的损失, 随着级数的增多, 输出效率大大降低.

本文提出的新型电荷泵, 采用动态衬底偏置技术^[3], 消除体效应的影响; 提出四相时钟驱动策略, 消除传输开关的阈值电压损失; 双支路交叉型输出级解决四相时钟电荷泵输出级阈值损失的问题, 降低输出电压的纹波, 提高电荷泵效率.

2 电荷泵工作原理和设计中的挑战

大部分电荷泵是基于 Dickson 电荷泵结构设计的^[4], 以 MOS 管代替二极管实现的 Dickson 电荷泵结构如图 1 所示, C 为泵电容, C_s 为节点寄生电容.

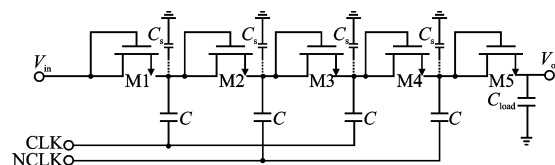


图 1 Dickson 电荷泵

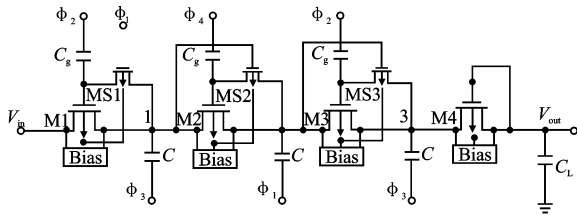
电路由两相不重叠时钟 CLK 和 NCLK 控制, 在前半个时钟周期, 假设第 n 个节点连接的时钟信号为高电平, 则第 $n+1$ 个节点所接时钟信号为低电平, 理想情况下, $V_n - V_{n+1} = V_{\text{clk}}$, V_{clk} 为时钟信号的幅值, C_n 和 C_{n+1} 的电荷共享使第 $n+1$ 节点的电压升

高, C_{n+1} 充电. 在后半个时钟周期, 第 $n+1$ 个节点电压被时钟信号抬高, 而第 $n+2$ 个节点的电压被时钟信号拉低, C_{n+1} 和 C_{n+2} 的电荷共享使第 $n+2$ 个节点的电压升高, C_{n+2} 充电. 依此工作原理, 理想情况下, 可在输出端得到 $(N+1)V_{in}$ 的电压. 而二极管形式连接的 MOSFET 开关有阈值电压 V_{th} , 考虑到节点寄生电容的影响, N 级 Dickson 电荷泵的输出电压可以用式(1)表示:

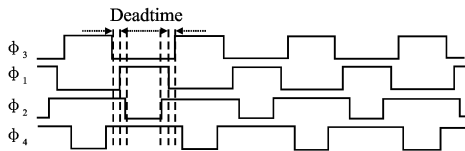
$$V_{out} = V_{in} + N(V_{clk} \cdot \frac{C}{C+C_s} - V_{th}) - V_{th} - NI_{out}R_{out} \quad (1)$$

从式(1)可以看出, 阈值电压的影响使输出电压有较大损失. 而在工作状态下, MOSFET 体端与源端有较大的电压差, 严重的体效应增大了阈值电压, 使得电荷泵输出电压有较大的阈值电压损失, 限制了电荷泵的最大可输出电压.

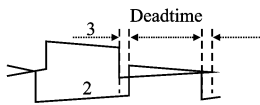
消除阈值电压影响的一种方法是采用四相时钟电荷泵结构^[5], 如图 2 所示. MOSFET 开关管的栅极电压由时钟信号 Φ_2 和 Φ_4 动态控制, 开关导通时, MOSFET 工作在深线性区, 消除了阈值电压损失. 衬底由 Bias 模块动态控制, 消除体效应的影响. 但输出级仍然有阈值电压损失. 图 2(b) 所示为电荷泵的四相时钟波形, 由于 Φ_1 和 Φ_3 是不重叠时钟, 在不重叠区 (Deadtime) 内, 辅助晶体管 M_s 没有被关断, 导致泵电容 C 在两个不重叠区和电容 C_g 进行电



(a) 四相时钟电荷泵



(b) 时钟波形



(c) 节点电压波形

图 2 四相时钟电荷泵、时钟波形与节点电压波形

荷共享, 导致电荷传输能力的降低. 以图 2(a) 中第三级为例分析, 节点 3 泵电容充电结束, 在不重叠区内, 节点 2 由高变为低, M_{s3} 导通, 并一直持续到节点 2 高电平上升沿到来, 在此时段内, 节点 3 由低变高如图 2(c) 所示, 驱使泵电容向 C_g 放电 ΔQ_g , $\Delta Q_g \approx C_g V_{clk}$, 然后 M_4 导通, 泵电容向第四级泵电容放电; 当节点 3 放电结束, 电平由高变为低, 驱使 C_g 向节点 3 放电 ΔQ_g ; $I_{out} = (\Delta Q - 2\Delta Q_g)/T$, 这使得单位周期内电荷的传输损失为 $2\Delta Q_g$, 降低了电荷泵的输出效率.

本文提出的新型电荷泵结构, 采用双支路交叉型结构, 消除了辅助晶体管不能完全关断的问题, 降低了输出电压波纹, 同时消除了输出级的阈值电压损失.

3 新型高效电荷泵

3.1 电荷泵结构与工作原理

基于四相时钟电荷泵电路, 本文提出了双支路交叉结构的四相时钟电荷泵, 以及新时钟驱动策略, 如图 3 所示, 电荷泵只有 PMOS 组成, 衬底端由 Bias 模块动态偏置, 以消除体效应的影响. 辅助晶体管 M_s 的栅极由另一支路的节点电压控制. Φ_2 和 Φ_4 接 C_g 电容, 幅值为 $2V_{DD}$, Φ_1 和 Φ_3 时钟重叠, 接泵电容, 幅值为 V_{DD} .

以第三级为例分析其工作原理, Φ_1 为低电平, Φ_3 为高电平, Φ_4 由高转低, 使 M_{3b} 导通, Φ_2 为高电平, M_{3a} 关断, 2b 节点泵电容给 3b 节点泵电容充电, 3b 电压比 3a 电压大约低 V_{DD} , 如图 4 所示, 辅助晶体管 M_{s3a} 导通. Φ_4 由低转高时, M_{3b} 关断, 充电结束. 此时, 节点 3b 电压先由低转高, 将辅助晶体管 M_{s3a} 关断, 然后, 节点 3a 电压有低转高, 避免了电容 C_g 随节点 3a 电压变化而充放电的发生. 随后, Φ_2 由高转低, 使 M_{3a} 导通, 2a 节点泵电容给 3a 节点泵电容充电.

在输出级, M_{5a} 、 M_{5b} 导通时, 栅源电压为约为 V_{DD} , 使 MOSFET 工作在深线性区, 避免了阈值电压的影响, 而且由于 M_{5a} 、 M_{5b} 每个半周期交替对负载电容充电, 减小了输出电压的纹波, 提高了电荷泵的输出效率.

每个 PMOS 导通时, 都工作在深线性区, 导通电阻 R_{on} 可由下式(2) 计算. 导通时, 栅源 V_{gs} 约为 V_{DD} , 降低了导通电阻 R_{on} , 减小了上电稳定时间.

$$R_{on} = \frac{1}{u_p C_{ox} \frac{W}{L} (V_{gs} - V_{th})} \quad (2)$$

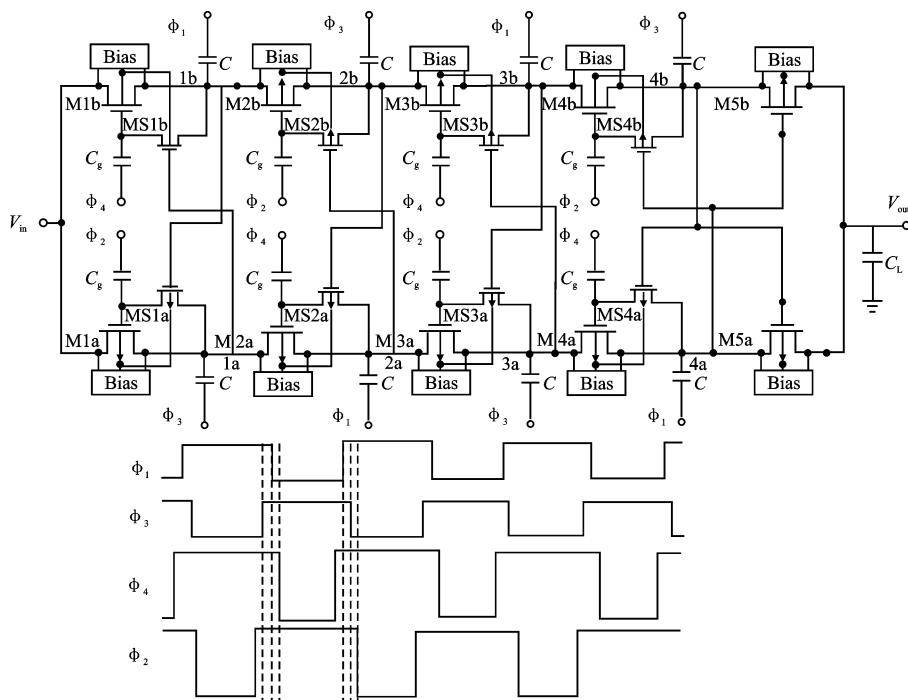


图3 本文提出的电荷泵和其时钟波形

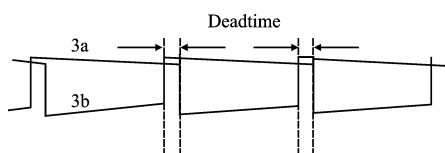


图4 节点 3a、3b 电压波形

3.2 电压转换单元

为增大传输晶体管导通时的栅源电压,降低其导通电阻,电压转换单元将时钟信号 Φ_2 和 Φ_4 从幅值为 V_{DD} 的波形转换成幅值 $2V_{DD}$ 的波形. 文献[6]中提出的电压转换单元(图5中的虚线框所示)电流驱动能力很低. 为增强 Φ_2 和 Φ_4 电流驱动能力,用一级交叉耦合电荷泵输出作为输出反相器的高电平,用文献[6]中的电压转换单元提供输出反相器的控制信号.

在 TSMC 0.18 μm 工艺下,仿真结果如图6所示,3.3 V 电源电压下,新的电压转换单元可转换输出 6 V 的信号波形,且有较强电流驱动能力. 文献[6]中提出的电压转换单元只能得到高电平为 5 V 的波形.

4 电路仿真与结果分析

在 TSMC 0.18 μm 工艺下,在只有电容负载的情况下,对本文提出的电荷泵做仿真,电源电压为

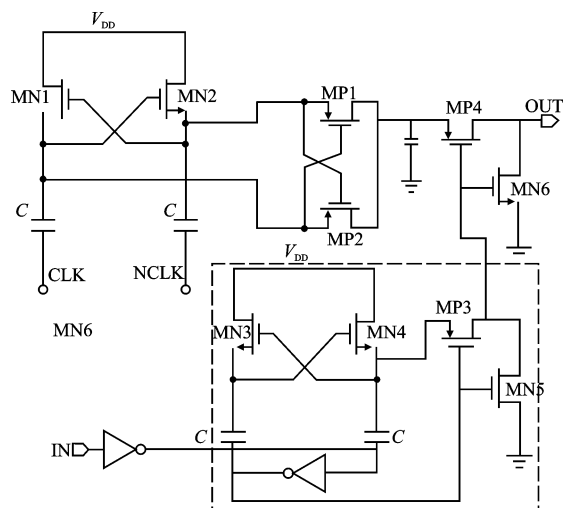


图5 电压转换单元

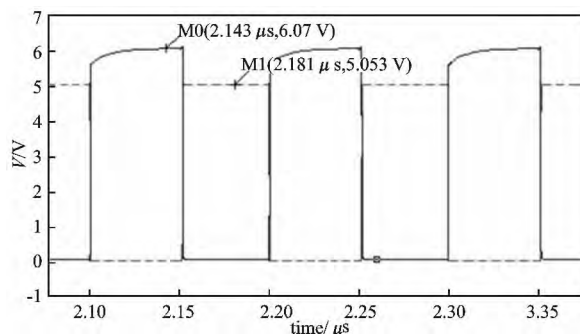


图6 电压转换单元输出波形

3.3 V, 将其与带有衬底动态偏置的 Dickson 电荷泵^[3]、四相时钟电荷泵^[5]比较,如图7所示,三个电荷泵的总泵电容值相等,传输开关晶体管的面积近似相等,可以看出本文提出的电荷泵消除了输出级的阈值电压损失,有较高的升压效率。

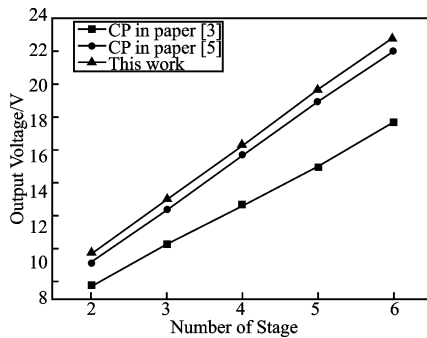


图7 不同级数下的电荷泵输出电压

由于新的时钟波形降低了传输晶体管的导通电阻,传输过程中有较小的压降,使得本电荷泵可工作在低电源电压下。图8所示为在1.0 V到1.8 V为电源电压时,Dickson 电荷泵和新型电荷泵的输出电压比较,在1 V电源电压,无电阻负载情况下,本文电荷泵仿真输出电压为4.8 V。

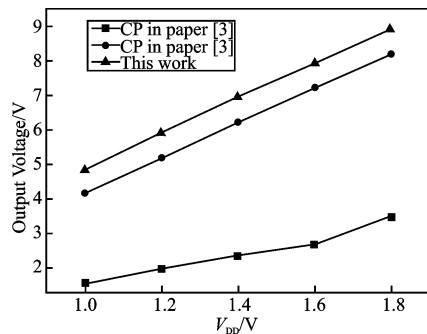


图8 不同电源电压下的输出电压

交叉输出级通过两支路电荷泵交替对负载电容充电,减小了每个周期内负载电容单独放电的时间,从而减小了波纹。通过尽量减小时钟重叠时间,可使电源电压对输出电压纹波的影响减至最小。在1.0~2.0 V电源电压下,负载电阻200 k Ω ,负载电容2 pF,文献^[5]中的电荷泵和本文的电荷泵仿真结果如图9所示,本文提出的电荷泵的输出电压纹波低于100 mV,而且不随电源电压的升高而增大。3.3 V电源电压下,四级电荷泵的输出电流和输出电压的关系如图10所示,在总泵电容相等,传输晶体管面积近似相等的情况下,相比文献^[5],有较强的电流驱动能力。

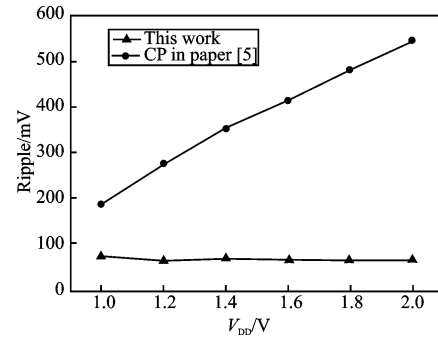


图9 不同电源电压下的输出电压纹波

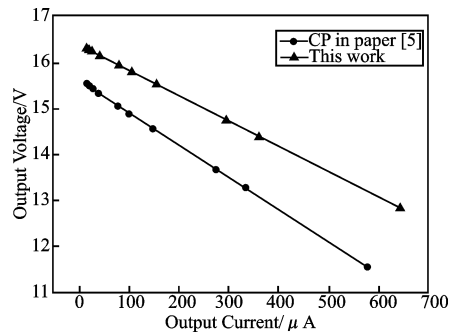


图10 不同负载下的输出电压

5 结束语

本文提出的电荷泵改进了传统四相时钟电荷泵输出级,消除了输出级的阈值电压损失,同时利用双支路的交叉耦合结构降低了输出纹波,提出的时钟驱动策略消除了辅助电容在死区的充放电问题,提高了输出效率。采用了TSMC 0.18 μm 工艺对电路进行了仿真验证,结果表明电荷泵有较高的升压效率和电流驱动能力,以及较低的输出电压纹波。

参考文献:

- [1] 郭嘉帅,王小力. 便携式系统中高效率、高精度、低噪声LED驱动电路设计研究[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(2): 80-84.
- [2] 周钦,钱松,程君侠. 适用于Flash Memory的负高压泵的实现[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(1): 21-24.
- [3] J Shin, I Chung, Y Park, et al. A new charge pump without degradation in threshold voltage due to body effect[J]. IEEE J Solid-State Circuits, 2000, 35(8): 1227-1230.
- [4] Dickson. On-chip high-voltage generation in MNOS integrated circuits using an improved voltage multiplier technique [J]. IEEE J Solid-State Circuits, 1976, 35(11): 374-378.

(下转第93页)

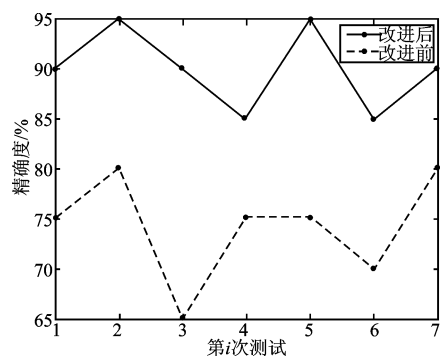


图1 精确度对比图

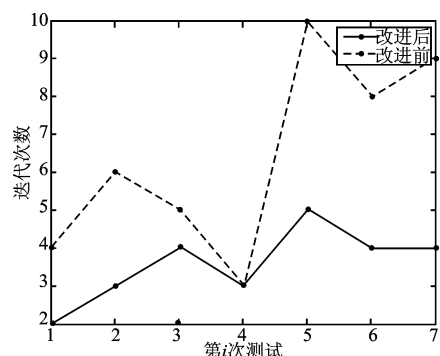


图2 迭代次数对比图

统的算法对初始聚类中心的选择和孤立点的消除采用的方法不当,并且没有考虑词与词的相关性导致实验结果的波动非常大,聚类的精确度也非常低。而实线部分是改进后的算法,但是由于受到分词工具的影响,还有就是 HowNet 出现了一些未登录词导致其精确度也受到一定影响,但是相比之前精确度有了明显的提高。

图2中的虚线部分表示改进前的算法,实线表示改进后的算法。改进前聚类算法是随机地选择初始聚类中心导致它的聚类迭代次数是非常多的。而改进后的算法,利用数据分布的稀疏程度然后采用 Z 分数选择初始聚类中心,所以相比改进前聚类的迭代次数大大减少了,迭代次数的减少也就意味着

聚类所需要的时间大大的减少了。

5 结束语

本文采用了 Z 分数消除孤立点,根据词汇相关性,构建一个替代词库,它类似于领域词典,提高了聚类的精确度,并且采用根据数据的分布的稀疏程度选择初始聚类中心,使得聚类的迭代次数减少,缩短了聚类的时间。但是由于分词工具准确率不是那么完美,还有 HowNet 出现的一些未登录词导致改进算法受到一定的影响,这在今后将进一步的研究。

参考文献:

- [1] 苏锦旗,薛惠峰,詹海亮. 基于划分的 K-均值初始聚类中心的优化算法[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(1): 8-11.
- [2] 周昭涛. 文本分析聚类分析效果评价及文本表示法[D]. 北京:中国科学院技术研究所, 2005.
- [3] Alexander Budanitsky, Graeme Hirst. Evaluating wordNet-based measures of lexical semantic relatedness[J]. Computational Linguistics, 2006 2(1):13-47.
- [4] 刘群,李素建. 基于知网的词汇语义相似度的计算[C] // 第三届汉语词汇语义学研讨会. 台北: [s. n.], 2002: 59-76.
- [5] 贾俊平. 统计学[M]. 北京:中国人民大学出版社, 2006.
- [6] 钟勇,赵向辉. 一种优化初始中心点的 k-means 文本聚类算法[J]. 郑州大学学报:理学版, 2009, 41(2): 30-30.

作者简介:

周爱武 女, (1965-), 副教授, 硕士生导师. 研究方向为数据库与 WEB 技术. E-mail: 943619770@qq. com.

汪贤惠 男, (1989-), 硕士生. 研究方向为数据挖掘. E-mail: 1027422682@qq. com.

刘惠婷 女, (1978-), 副教授, 硕士生导师. 研究方向为数据挖掘.

(上接第 89 页)

IEEE, 2001: 228-231.

- [5] Nan Yan, Hao Min. A high efficiency All-PMOS charge pump for low-voltage operation[C] // Proc IEEE Asian Solid-State Circuits Conf. Hsinchu, Taiwan: IEEE, 2005: 361-364.
- [6] Hongchin Lin, Nai-Hsien Chen. An efficient clock scheme for low-voltage four-phase charge pumps[C] // proceedings of the International Symposium on VLSI Technology System, and Applications. Hsinchu,

作者简介:

李卿 男, (1989-), 硕士研究生. 研究方向为模拟集成电路设计. E-mail: liqing. ic@foxmail. com.

周健军 男, (1970-), 教授, 博士生导师. 研究方向为模拟射频集成电路设计、混合集成电路设计.