

用于相变存储器的超低输出纹波电荷泵

富聪, 宋志棠, 陈后鹏, 蔡道林, 王倩, 宏潇

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所 上海 长宁区 20050)

【摘要】针对相变存储器编程操作对电荷泵低输出纹波与高瞬态响应速度的要求,提出了一种超低输出电压纹波的开关电容型电荷泵。相比于传统开关电容型电荷泵,在充电阶段,由电压比较器控制泵电容充电时间,泵电容被充电至预先设定的电压值 V_o-V_{in} 后停止充电,其中 V_o 为预期输出电压, V_{in} 为输入电源电压;放电阶段,泵电容串联在输入电源 V_{in} 与电荷泵输出端,泵电容上极板电压自然地提升至 V_o 并向外部负载输出电流。通过该方法固定电荷泵输出电压,可有效地消除由于电容间电荷分享所造成的输出纹波,并兼顾了高瞬态响应速度。使用中芯国际0.18 μm 标准CMOS工艺模型进行仿真验证,结果表明新结构的电荷泵在输入电压为2.2~4.8 V间,输出5 V电压,10 mA负载电流,输出纹波低于3 mV,电源效率最高可达88%。

关键词 电荷泵; DC-DC; 低输出纹波; 相变存储器

中图分类号 TN432

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2012.02.027

Novel Low-Ripple Charge Pump for Phase Chang Memory

FU Cong, SONG Zhi-tang, CHEN Hou-peng, CAI Dao-lin, WANG Qian, and HONG Xiao

(Shanghai Institute of Micro-System and Information Technology, Chinese Academy of Sciences Changning Shanghai 20050)

Abstract A low ripple switched capacitor charge pump applied to phase change memory (PCM) is proposed. Compared with the conventional switched capacitor charge pump, the flying capacitor of the proposed charge pump is charged to the difference between the prospective output voltage and the input voltage during the charge phase. In the discharge phase, the flying capacitor is connected between the input and output of the charge pump to transfer energy to output, so the output is regulated at prospective voltage. This new operation mode can reduce the output ripple caused by charge redistribution. A simulation was implemented for a DC input range of 2.8~4.4 V in a SMIC standard 0.18 μm CMOS process. Result shows the new operation mode can regulate the output about 5 V with a load condition from 0 to 10 mA, the ripple voltage is lower than 3 mV and the highest power efficiency reaches 88%.

Key words charge pump circuits; DC-DC converters; low ripple; phase change memory

作为一种非易失型存储器,相变存储器(PCM)利用硫族化合物在晶态和非晶态间巨大的电阻差异存储数据,其制造工艺与CMOS工艺兼容且简单,具有高编程速度、高存储密度、低成本等优势,随着近几年的研究开发,PCM已被公认为下一代最有希望的存储器之一。在相变存储器芯片中,需要使用一个高瞬态响应速度,低输出纹波的电荷泵,将输入电源提升后,输出一个大约5 V的直流电压,提供给每个存储单元0.2~2 mA的电流,将相变材料融化编程^[1]。

使用跳周期模式固定输出电压的开关电容型电荷泵,有着较快的瞬态响应速度,但由于泵电容连

接输出电容时的电荷分享,会造成较大的输出电压纹波,影响相变存储器的编程稳定性和降低电荷泵自身的电源效率^[2]。

时钟频率调制电荷泵,虽然可以取得相比于跳周期型电荷泵更低的输出电压纹波,但是相变存储器在编程过程中,短时间内输出电流会有较大的变化,以8 bit并行操作的PCM为例,1 μs 内通常可以变化0~10 mA,时钟频率调制电荷泵相对较慢的瞬态响应速度,并不适于相变存储器^[3-4]。

一种新型伪连续控制输出的电荷泵可有效地兼顾低输出纹波和高瞬态响应速度,但由于电荷泵工作在空载和满载的情况下,不仅需要较为复杂的相

收稿日期: 2011-11-20; 修回日期: 2011-02-26

基金项目: 国家集成电路重大专项(2009ZX02023-003); 国家重点基础研究发展计划(2010CB934300, 2011CBA00602, 2011CB932800); 国家自然科学基金(60906004, 60906003, 61006087, 61076121); 上海市科委资助项目(1052nm07000)

作者简介: 富聪 (1984-), 男, 博士生, 主要从事相变存储器电路与DC-DC方面的研究。

位补偿以满足其内部三级放大器的稳定,而且还增加了芯片面积^[5]。

1 影响输出纹波的重要因素

开关电容型电荷泵工作的典型电路图如图1所示。充电阶段,泵电容 C_f 被充电至输入电压 V_{in} ;放电阶段, C_f 被连接在 V_{in} 与电荷泵输出端 V_{out} 之间, C_f 上电荷转移至输出电容 C_{out} 。

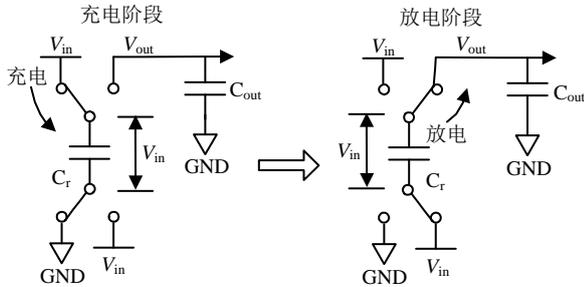


图1 开关电容型电荷泵工作典型电路图

电荷分享与电流输出,是造成传统电荷泵输出纹波的两个重要因素。在电荷泵的放电阶段,电荷从泵电容 C_f 转移至输出电容 C_{out} ,由电荷分享造成的输出纹波为:

$$V_{ripple_p} \cong \frac{(2V_{in} - V_{out})C_f}{C_{out} + C_f}$$

由输出电流造成的输出纹波为:

$$V_{ripple_n} \cong \frac{I_{load}T}{C_{out}}$$

式中, I_{load} 为输出负载电流; T 为电荷泵一次泵电的完整工作周期。在负载电流10 mA,工作周期为1 μ s,泵电容为0.3 pF,输出电容为3 μ F,输入电压为3 V,输出电压为5 V的情况下,由电荷分享造成的输出纹波约为90 mV,而由输出电流造成的输出纹波仅为3 mV,可以看出典型的开关电容型电荷泵输出纹波主要是由电荷分享造成的。

2 新型低输出纹波电荷泵结构

本文提出了一个新的开关电容型电荷泵及其工作方法,以消除由电荷分享所造成的输出纹波,并兼顾较高瞬态响应速度,如图2所示,其中 V_o 为预期的电荷泵输出电压, clk_1 与 clk_2 为非交叠时钟信号。该电荷泵的工作方式如下:当 $clk_1=1$, $clk_2=0$,电荷泵进入充电阶段, M_1 与 M_3 导通,泵电容 C_f 开始被充电,直到 C_f 的上极板CFP电压高于参考电压 $V_o - V_{in}$ 值,电压比较器控制 M_1 关断,泵电容被充电至 $V_o - V_{in}$;当 $clk_1=0$, $clk_2=1$,电荷泵进入放电阶段, M_2 和 M_4 导通, C_f 下极板CFN连接至 V_{in} ,由于 C_f 两端电压不能跳变,所以CFP被提升至 V_o ,若输出电压 V_{out} 低于 V_o ,则电荷将从 C_f 上转移到 C_{out} 。当电荷泵工作在稳定状态后,输出电压 V_{out} 将会稳定在电荷泵的预期输出电压 V_o 。该工作方法可以有效地消除在放电阶段,由于 C_f 与 C_{out} 间的电荷分享所造成的输出纹波。

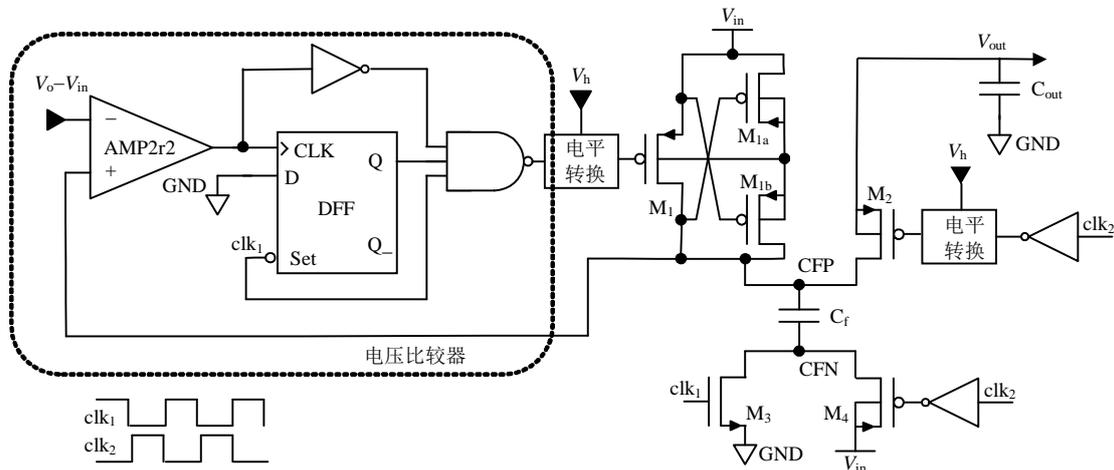


图2 低输出纹波电荷泵新结构

连接在 M_1 与 M_2 栅极的电平转换电路,将控制信号的高电平转换为 V_h ,其中 V_h 为输入电源电压 V_{in} 与电荷泵输出电压 V_{out} 中的较高者,以保证 M_1 与 M_2 能够完全关断。而 M_{1a} 与 M_{1b} 在充放电阶段交替导通,确保 M_1 的N阱可以连接在其源漏中电位的较高者。

为了确保电荷泵在充电阶段的稳定性,图2中的电压比较器由轨到轨运放结合D触发器构成,保证

M_1 在充电阶段只会开启一次。

在充电阶段开始时,如果CFP电压低于 $V_o - V_{in}$,放大器输出低电平, $clk_1=1$,D触发器Q端输出1,比较器输出低电平, M_1 开启,电容 C_f 被充电。随着CFP的电压逐渐升高到 $V_o - V_{in}$ 时,放大器输出端产生的上升沿,使得D触发器Q端输出0,关断 M_1 。在同一个充电周期由于漏电或噪声等原因CFP电压再次低于

$V_o - V_{in}$ 值时, M_1 也不会重新开启, 直到下个充电周期。

在充电阶段开始时, 如果CFP电压高于 $V_o - V_{in}$, 放大器输出高电平, 比较器输出低电平, M_1 关断, 在同一个充电周期内, 如果CFP低于 $V_o - V_{in}$, 则 M_1 会开启但只会开启一次, 直到CFP再次高于 $V_o - V_{in}$ 。

在放电阶段, $clk_1=0$, 电压比较器输出高电平, M_1 关断, 同时D触发器Q端被置为1。

虽然简单的使用迟滞比较器替代上述结构也能取得稳定电路的效果, 但由于迟滞比较器的翻转阈值电压难于精确控制, 所以会导致电荷泵最终输出电压的偏差。

由于电荷泵输入电源电压范围为2.2~4.8 V, 而输出电压 V_{out} 在电路启动时从0 V逐渐提升至5 V, 为避免发生闩锁效应, 本文设计了一个电源比较电路, 如图3所示, 该电路将 V_{in} 与 V_{out} 中电压较高者接至 V_h , 提供给图2中的电平转换电路。当 V_{out} 高于 V_{in} 时, $C_o=1$, V_{out} 通过 M_5 连接至 V_h 时; 反之, V_{in} 通过 M_6 连接至 V_h , 其中 $W_2/L_2=mW_1/L_1$, $W_4/L_4=mW_3/L_3$ 。电平转换电路确保当 V_{out} 电压高于 V_{in} 时, M_6 能够完全关断, 从而减小 V_{in} 与 V_{out} 间的漏电流。串联在 M_5 、 M_6 漏极与所在N阱之间的电阻, 可限制由于前级比较电路延迟导致N阱正偏所产生的寄生PNP基极电流。相比于传统的电源比较电路^[6], 该设计不需要分压电阻和运放型电压比较器, 有效地减小了所占用的芯片面积和功耗。

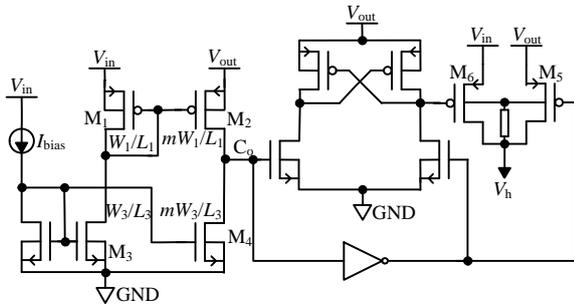


图3 新型电源电压比较器

由于电荷泵电路存在内阻, 输出电压 V_{out} 会随着

负载电流的增大而逐渐下降, 为消除负载电流对输出电压的影响, 将参考电压 $V_o - V_{in}$ 加入一项修正因子, 修改为 $V_o - V_{in} + k(V_o - V_{out})$ 。参考电压 $V_o - V_{in}$ 生成电路由带隙基准、运算放大器和分压电阻组成, 如图4所示。图中, 分压电阻、带隙基准电压 V_{bg} 与预期输出电压 V_o 的关系为:

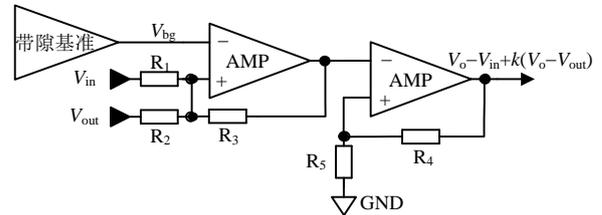


图4 参考电压 $V_o - V_{in}$ 生成电路

$$\frac{R_1}{R_2} = k$$

$$\frac{R_2}{R_3} = \frac{(1+k)(V_o/V_{bg} - 1)}{k}$$

$$\frac{R_4}{R_5} = (1+k) \left(\frac{V_o}{V_{bg}} - 1 \right) - 1$$

在本文设计中带隙基准电压 V_{bg} 约为1.2 V, 电荷泵预期输出电压 V_o 为5 V, $k=4$ 。

该电荷泵电路还包括了非交叠时钟发生电路、软启动电路和过热保护电路。

3 仿真结果

为获得更高的电源转换效率, 泵电容 C_f 与输出电容 C_{out} 选用片外电容, 分别为0.3 μF 和3 μF ^[7]。时钟发生器频率设计为1 MHz。在中芯国际0.18 μF 标准CMOS工艺模型下, 对电路进行了Spectre仿真。仿真结果表明, 在输入电压范围为2.2~4.8 V, 电荷泵输出5 V电压, 提供最大负载电流10 mA。

表1列出了负载电流分别为空载、5 mA和10 mA时, 电荷泵的输出电压、电源效率与输出纹波的仿真结果。其中新型电荷泵的输出纹波小于3 mV, 与理论值相符, 小于传统开关电容型电荷泵几十毫伏的输出纹波。

表1 不同负载电流下电荷泵的输出电压、输出纹波和电源效率

输入电压/V	空载输出电压/V	5 mA 负载电流			10 mA 负载电流		
		输出电压/V	电源效率/(%)	输出纹波/mV	输出电压/V	电源效率/(%)	输出纹波/mV
2.8	4.99	4.98	87.9	1.31	4.97	88.8	2.58
3.0	4.99	4.98	82.0	1.33	4.97	83.3	2.59
3.2	4.99	4.98	77.5	1.32	4.97	77.7	2.60
3.4	4.99	4.98	72.4	1.33	4.97	73.2	2.63
3.6	4.99	4.98	68.6	1.30	4.97	68.7	2.64
3.8	4.99	4.98	64.8	1.57	4.97	65.4	2.62
4.0	4.99	4.98	61.3	1.33	4.98	62.2	2.60
4.2	4.99	4.99	58.3	1.30	4.98	59.0	2.52
4.4	4.99	4.99	55.6	1.31	4.98	56.3	2.58

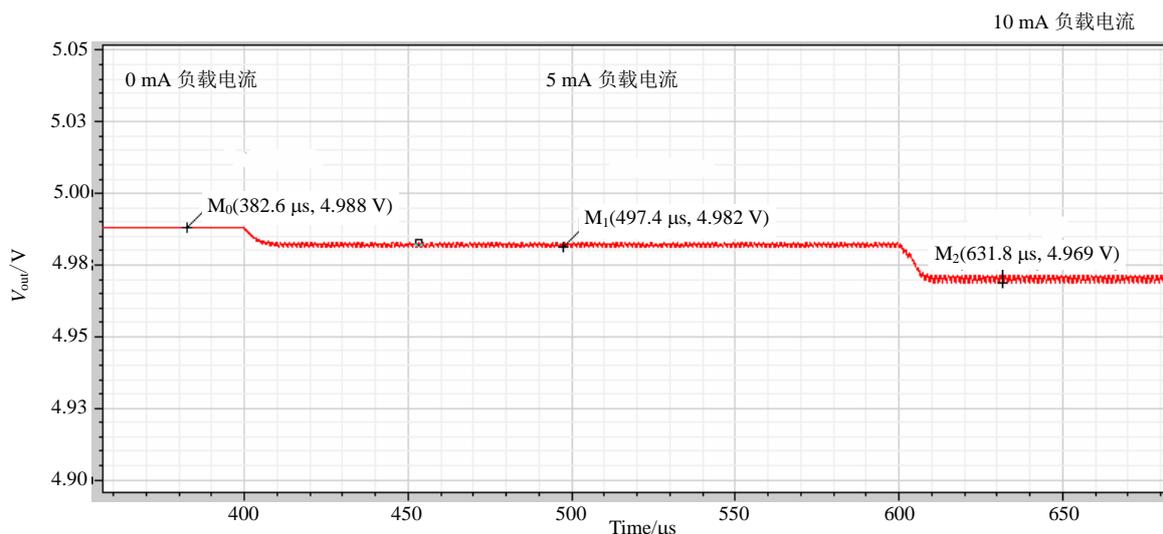


图5 输出电压随负载电流变化的瞬态仿真结果

图5为电荷泵输出电压随负载变化的瞬态响应。

4 结论

本文设计了一种用于相变存储器的低输出纹波开关电容型电荷泵,相比于传统开关电容型电荷泵,在充电阶段泵电容被充电至预先设定的电压值 V_o-V_{in} ;放电阶段,泵电容串联在输入电压 V_{in} 与输出端,通过该方法将输出电压稳定在 V_o 。提出了一种新型的电源比较电路,有着更小的芯片面积并可有效地减小输入电源与电荷泵输出间的漏电流。在中芯国际 $0.18\ \mu\text{m}$ 标准CMOS工艺模型下,对电路进行了Spectre仿真,仿真结果表明在输入电压为 $2.2\sim 4.8\ \text{V}$,电荷泵输出 $5\ \text{V}$ 电压,提供最大负载电流 $10\ \text{mA}$,输出纹波低于 $3\ \text{mV}$,电源转换效率最高可达 88% ,满足相变存储器对编程电源的要求。

参考文献

[1] LEE K J, CHO B H, CHO W Y, et al. A $90\ \text{nm}\ 1.8\ \text{V}\ 512\ \text{Mb}$ diode-switch PRAM with $266\ \text{MB/s}$ read throughput[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2008, 43(1): 150-162.

[2] SU Ling, MA Dong-sheng. Design and optimization of integrated low-voltage low-power monolithic CMOS charge pumps[C]//International Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion. ISCHIA: SPEEDAM, 2008: 41-43.

[3] LEE J Y, KIM S E, SONG Seong-Jun, et al. A regulated charge pump with small ripple voltage and fast start-up[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2006, 41(2): 425-432.

[4] SONG Ha-sun, KO Ju-hyun, Kim Daejeong. High efficiency on-chip charge pump DC-DC converter for LCD drivers[J]. Current Applied Physics, 2007, 7(4): 450-455.

[5] LEE H, MOK P K T. An SC voltage doubler with pseudo-continuous output regulation using a three-stage switchable opamp[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2007, 42(6): 1216-1229.

[6] GREGOIRE B R. A compact switched-capacitor regulated charge pump power supply[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2006, 41(8): 1944-1953.

[7] MAXWELL J C. A treatise on electricity and magnetism[M]. 3rd ed. Oxford: Clarendon, 1892: 68-73.

编辑 张俊