

引用格式:于云,谢亮,张文杰,等.一种高效低纹波双端输出的电荷泵设计[J].微电子学与计算机,2021,38(3):66-71.[YU Y,XIE L,ZHANG W J, et al. Design of a high-efficiency and low-ripple charge pump circuit with double output[J]. Microelectronics & Computer, 2021, 38(3): 66-71.]

# 一种高效低纹波双端输出的电荷泵设计

于 云<sup>1</sup>, 谢 亮<sup>2</sup>, 张文杰<sup>2</sup>, 金湘亮<sup>1,2</sup>

(1 江苏科技大学 电子信息学院, 江苏 镇江 212003; 2 江苏芯力特电子科技有限公司, 江苏 句容 2124004)

**摘 要:** 针对传统电荷泵电压损耗严重和输出纹波较高的缺点, 本文提出了一种高效低纹波双端输出电荷泵。该电荷泵基于传统电荷泵做了结构上的改进, 利用栅压驱动, 减小输出纹波, 达到正反相倍压输出, 并设计一款稳定高驱动能力的振荡器电路, 振荡器电源由电荷泵输出端直接自给, 降低了电压损耗, 提高了转换效率。电荷泵电路基于 0.6  $\mu\text{m}$  CMOS 工艺进行设计与仿真, 仿真结果表明改进型电荷泵启动稳压时间仅为 51  $\mu\text{s}$ , 在常规电源电压 2.8~5 V 均可达到正反相倍压的目的。典型电源电压 3.3 V, 负载电流 10 mA 条件下, 输出  $V+$  可达 6.2 V,  $V-$  可达 -6 V, 纹波仅为 15 mV, 具有转换效率高, 稳压输出的优点, 改善了性能指标。

**关键词:** 电荷泵; 正负倍压; 转换效率; 低纹波; 高驱动

**中图分类号:** TN432

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-7180(2021)03-0066-06

## Design of a high-efficiency and low-ripple charge pump circuit with double output

YU Yun<sup>1</sup>, XIE Liang<sup>2</sup>, ZHANG Wen-jie<sup>2</sup>, JIN Xiang-liang<sup>1,2</sup>

(1 Electronic Information College, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China; 2 Jiangsu Silicon Internet of Things Technology Co. Ltd, Jurong 212400, China)

**Abstract:** Aiming at the shortcomings of the traditional charge pump with serious voltage loss and high output ripple, a high efficiency low ripple double-ended output charge pump is proposed in this paper. Based on the traditional charge pump, drive with gate voltage, the charge pump has been structurally improved to reduce the output ripple and achieve positive and negative voltage doubled output, and design a stable and high-driving oscillator circuit. The power supply of the oscillator is self-sufficient from the output of the charge pump, reducing Voltage loss improves conversion efficiency. The charge pump circuit is designed and simulated based on the 0.6  $\mu\text{m}$  process. The simulation results show that the improved charge pump's start-up voltage regulation time is only 51  $\mu\text{s}$ , and it can achieve the purpose of positive and reverse voltage multiplication at a conventional power supply voltage of 2.8~6 V. Typical power supply voltage 3.3 V, load current 11 mA, output  $V+$  up to 6.2 V,  $V-$  up to -6 V, ripple is only 15 mV, has the advantages of high conversion efficiency and regulated output. The performance index is enhanced.

**Key words:** charge pump; positive and negative voltage multiplication; conversion efficiency; low ripple; high drive

# 1 引言

电荷泵(charge pump)电路是一种基于电容积累电荷的特性来产生不同电压域的输出电路。随着集成电路的发展,芯片中集成的模块数也越来越多,而这些模块所需要的驱动电压逐渐趋向于多元化,为了满足发展的需要,电荷泵电路越来越得到了普遍的应用<sup>[1]</sup>。但是由于电荷泵电路特殊的结构成为了芯片主要的功耗来源,输出的不稳定性也降低了电路的整体性能。因此设计出一款高效低纹波的电路成为了广泛关注的课题<sup>[2]</sup>。

目前电荷泵领域运用最广泛的也是升压效果最好的是四相位 charge pump 电路<sup>[3]</sup>,具体电路结构如图 1 所示。该电路运用四相位的特殊结构,克服了传统电荷泵电路阈值电压损耗严重的问题,提高了转换效率<sup>[4]</sup>。但是该电路首先是时钟直接驱动电容,由于电荷泵电路正常工作的电流较大,为了避免输出电压纹波较大会采用较大的电容,直接用时钟驱动对时钟的驱动能力要求很高,大大增加了电路的设计难度<sup>[5]</sup>。并且使用了太多的电容和时钟驱动信号,牺牲了版图面积。

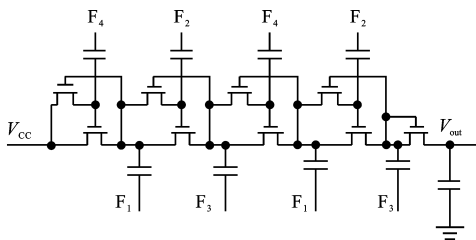


图 1 四相位时钟 Charge Pump

本文对传统的电荷泵做了结构上的改进,并设计一款适用于本结构的振荡器(OSC)电路,使得在转换效率和减小输出纹波方面体现良好的性能,该电路在 2.8~5 V 的电压域内,电荷泵均可正常工作,达到正反相双端输出倍压的目的。

# 2 电路设计

## 2.1 电路总体结构与工作原理

图 2 为本设计的总体结构图,主要包括 OSC 模块,Non-overlap CLK 模块,charge pump 模块。其中 OSC 模块利用 MOS 管连接的电容进行充放电,产生占空比为 50% 的周期性方波信号 CLK。OSC 模块产生的方波信号经过 Non-overlap CLK 模块对信号进行处理,产生两两不相交叠的时钟信号,该时钟信号作为 Charge pump 模块的驱动信号,避免

了开关管同时导通而造成的电荷回流现象<sup>[6]</sup>。Charge pump 电路利用非交叠时钟信号,周期性的导通和关闭 MOS 开关管来控制电荷的传输,其中利用片外电容的形式对电荷进行积累,从而达到升高和倒相电压的目的,大大减小了版图的面积。

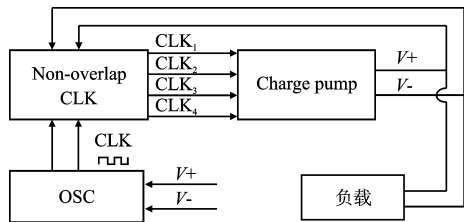


图 2 电荷泵总体框图

## 2.2 电荷泵电路

电荷泵模块的实现方法如图 3 所示。

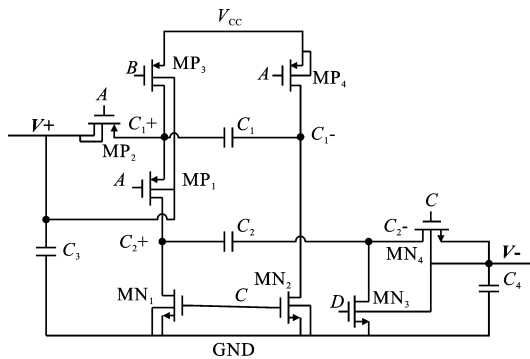


图 3 双端输出电荷泵电路

为了避免时钟直接驱动电容所造成的设计复杂,性能不稳定的缺陷。本次设计对传统的电荷泵电路做了改进,用高幅值时钟驱动 MOS 开关管栅压的形式,来控制开关管的导通与关闭,从而控制电荷的流向,减小了 MOS 管的导通阻抗。非交叠时钟驱动为了不让电路短路和电荷逆流现象的出现。电荷泵电路非交叠驱动信号真值表如表 1 所示。

表 1 时钟信号真值表

|   | 时刻 1 | 交叠时刻 | 时刻 2 | 交叠时刻 |
|---|------|------|------|------|
| A | H    | H    | L    | H    |
| B | L    | H    | H    | H    |
| C | H    | L    | L    | L    |
| D | L    | L    | H    | L    |

其中时钟 A 与时钟 B 为两相非交叠时钟,时钟 C 与时钟 D 为两相非交叠时钟,并且时钟 A 与时钟 D 相位相反,时钟 B 与时钟 C 相位相反。时钟信号的最高电位 H 为 V+,最低电位 L 为 V-。本设计通过对传统电荷泵结构改进,只需要用输出 V+,V- 连接衬底保证衬底电势,避免了体效应的问题。

### 2.2.1 电荷泵具体实现方式

$V+$  产生原理:

当时钟信号  $A$ 、 $C$  为高电平,  $B$ 、 $D$  为低电平, 此时  $MP_1$ 、 $MP_2$ 、 $MP_4$  关闭,  $MP_3$  导通,  $MN_1$ 、 $MN_2$  导通. 电荷泵电路处于充电阶段, 电源电压  $V_{CC}$  对泵电容  $C_1$  进行充电, 充电电荷在泵电容  $C_1$  的一端积累, 此时  $C_1$  上的电压为电源电压  $V_{CC}$ ,  $C_1$  下的电压为 0. 当时钟信号  $A$ 、 $C$  为低电平,  $B$ 、 $D$  为高电平时, 此时  $MP_1$ 、 $MP_2$ 、 $MP_4$  导通,  $MP_3$  关闭,  $MN_1$ 、 $MN_2$  关闭, 电荷泵电路处于放电阶段,  $C_1$  上电压约为电源电压  $V_{CC}$ , 由于电容  $C_1$  两端电压差不可突变, 实现  $C_1$  上的电压为  $2V_{CC}$ , 此时泵电容  $C_1$  在  $C_1$  上的电荷逐渐放电到输出电容  $C_3$  上面, 当  $MP_2$  管导通,  $MP_2$  管连接电容  $C_3$  构成开关电容电路, 输出端  $V+$  电压跟随  $C_1$  上电压逐渐上升, 当  $MP_2$  关断时,  $V+$  保持不变. 使输出端电压  $(V+) = (C_1+) = 2V_{CC}$ , 实现二倍的升压目的.

$V-$  产生原理:

当时钟信号  $A$ 、 $C$  为低电平,  $B$ 、 $D$  为高电平时,  $MP_1$ 、 $MN_3$  导通,  $MN_1$ 、 $MN_2$ 、 $MN_4$  关闭, 此时  $C_2$  上电压等于  $C_1$  上电压等于  $V+$  电压,  $C_2$  下电压为 0. 当时钟信号  $A$ 、 $C$  为高电平,  $B$ 、 $D$  为低电平时,  $MP_1$ 、 $MN_3$  关闭,  $MN_1$ 、 $MN_2$ 、 $MN_4$  导通. 由于  $MN_1$  导通导致在第二电容积累的电荷被泄放, 使  $C_2$  上电位拉低至 0, 电容  $C_2$  两端的电压差不变,  $(C_2-) = -(C_1+)$ . 此时  $V-$  电压跟随  $C_2$  下电压,  $(V-) = (C_2-) = -2V_{CC}$ .

为了防止同臂端的两个开关管导通造成电流过大, 电路加入短时间的交叠阶段, 此时开关管全部关闭, 没有电荷的传输, 此时泵电容两端电压不变. 至此完成了一个正反相倍压工作周期, 实现在电源电压  $V_{CC}$  为  $2.8 \sim 5$  V 时, 输出电压约为  $\pm 2V_{CC}$ .

### 2.2.2 电压损耗与输出纹波分析

在实际电路工作中会产生电压的损耗问题, MOS 管开关的导通阻抗及电容的等效串联电阻 (ESR) 的损耗. 图 4 为电荷泵工作状态简化示意图.

当电荷泵工作在放电阶段时, 此时在输出端电流变化为  $2I_{out}$ , 电路在  $S_2$ 、 $S_3$  导通阻抗 ( $R_{ON}$ ) 和电容  $C_1$  阻抗 (ESR) 上的电压损耗为:

$$\begin{aligned} P_{ON} &= (2I_{out})^2 (2R_{ON} + ESR_{C1}) \\ &= I_{out}^2 (8R_{ON} + 4ESR_{C1}) \end{aligned} \quad (1)$$

在  $C_1$  上面的等效电阻的损耗为:

$$P_{C1} = I_{out}^2 R_{C1} = I_{out}^2 \frac{1}{F_{C1}} \quad (2)$$

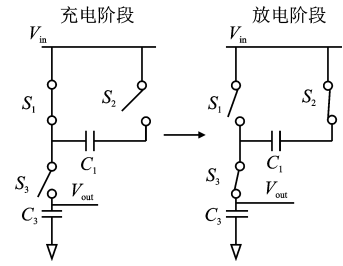


图 4 电荷泵工作简化示意图

当电流流过输出电容  $C_3$  时电流变为  $I_{out}$ , 此时电容的 ESR 损耗为:

$$P_{C3} = I_{out}^2 * ESR_{C3} \quad (3)$$

由上式(1)(2)(3)可知, 当电流设为  $I_{out}$  时, 总的损耗电阻:

$$R_{OUT} = 8R_{ON} + 4ESR_{C1} + \frac{1}{F_{C1}} + ESR_{C3} \quad (4)$$

由此可以推出电荷泵的输出:

$$V_{out} = 2V_{in} - I_{out} * R_{OUT} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} V_{out} &= 2V_{in} - I_{out} * (8R_{ON} + 4ESR_{C1} \\ &\quad + \frac{1}{F_{C1}} + ESR_{C3}) \end{aligned} \quad (6)$$

根据电荷守恒定律, 可以求出电荷泵电源转换效率, 设充电时间  $t_A$ , 放电时间  $t_B$ , 等待时间  $t_{off}$ , 充电电流  $I_A$ , 输出电流  $I_{out}$ , 输入电流  $I_{in}$ ,  $T$  为电荷泵时钟周期则公式:

$$\begin{aligned} I_{in} &= \frac{(I_A + I_{out}) * t_A + I_{out} * t_B + I_{out} * t_{off}}{T} \\ &= \frac{I_{out} * T + I_A * t_A}{T} \\ &= \frac{I_{out} * T + I_{out} * T}{T} \\ &= 2 * I_{out} \end{aligned} \quad (7)$$

电源转换效率:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{V_{out} * I_{out}}{V_{in} * I_{in}} = \frac{V_{out}}{2V_{in}} \\ &= \frac{2V_{in} - I_{out} * (8R_{ON} + 4ESR_{C1} + \frac{1}{F_{C1}} + ESR_{C3})}{2V_{in}} \end{aligned} \quad (8)$$

由公式(8)可知想要降低电压输出损耗提高转换效率需要降低电容的 ESR 阻抗, MOS 管导通阻抗  $R_{ON}$  和适当增加时钟频率. 当电路正常工作时, MOS 管工作在线性区, 其导通阻抗为 (以 NMOS 为例):

$$R_{ON} = \frac{1}{\mu C_{OX} (\frac{W}{L}) V_{ox}} \quad (9)$$

式中,  $\mu$  为沟道载流子迁移率,  $C_{ox}$  是单位面积的栅氧化层电容,  $V_0$  是过驱动电压<sup>[7]</sup>. 由公式(9)可以看出当  $W/L$  和过驱动电压较大时输出阻抗减小, 因此设计中增大了 MOS 开关管的宽长比的同时, 利用时钟电源自给的方式增大振幅, 从而增大过驱动电压  $V_{gs} - V_{th}$ , 当  $V_{gs}$  电压越高时(在工艺允许范围内), 增加了沟道内部场强, 电流呈非线性增长, 大大降低了 MOS 管的导通阻抗. 因此利用时钟电源自给可以使 MOS 管完全打开和关闭, 降低电压损耗, 增加转换效率.

为了在电容上面把电压的损耗降为最低, 在选用片外电容时, 考虑低的 ESR 电容, 一般选择陶瓷电容, 其 ESR 值与时钟频率和电容大小如图 5 所示(以村田电容为例). 从图中可知在工作频率  $1 \sim 10$  M 之间, 选择  $0.1 \mu\text{F}$  可以获得较小的 ESR 的值.

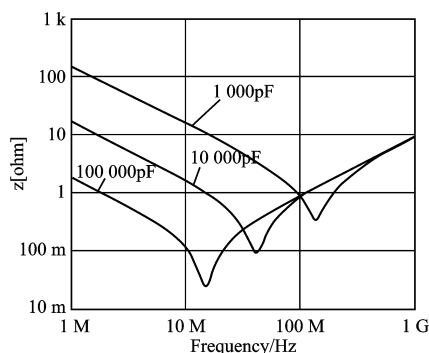


图5 村田电容 ESR 规格

输出纹波的产生主要由对电容周期性充放电引起的, 主要分为两种, 在电荷泵的放电阶段, 电荷从泵电容  $C_1$  转移至输出电容  $C_3$ , 由电荷分享造成的输出纹波为:

$$V_{\text{ripple-1}} \approx \frac{(2V_{\text{in}} - V_{\text{out}})C_1}{C_1 + C_3} \quad (10)$$

由输出电流造成的输出纹波为:

$$V_{\text{ripple-2}} \approx \frac{I_{\text{out}}T}{C_3} \quad (11)$$

由公式(10)(11)可知, 高的电压转换效率可以减小电压纹波, 高频的时钟保证了电荷泵的输出电容能够在充放电时可以及时的补充电荷, 从而降低纹波的产生. 本次设计中典型  $3.3 \text{ V}$  电压下, 采用的电容均为  $0.1 \mu\text{F}$ , 在频率  $4 \text{ MHz}$ , 负载电流  $10 \text{ mA}$ , 电压转换效率为  $95\%$ , 可以推算出输出纹波约为  $26 \text{ mV}$ , 实际工作略低于此值.

### 2.3 振荡器与非交叠时钟模块

振荡器模块 OSC 与两相非交叠时钟 Non-overlap CLK 产生模块电路原理如图 6 所示.

振荡器与非交叠时钟电路均采用电荷泵输出端

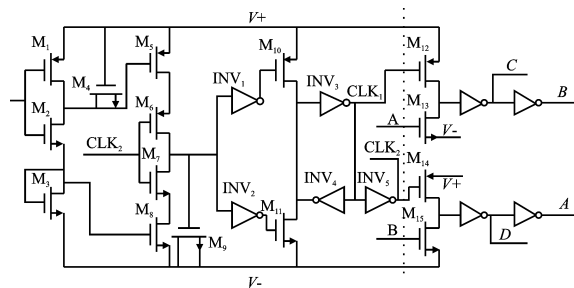


图6 振荡器与非交叠时钟电路

$V+$  与  $V-$  作为驱动电源, 以此增加时钟的幅值, 高的幅值可以保证驱动的开关管完全的打开与关闭, 降低电压的损耗. 虚线左侧为振荡器电路, 虚线右侧为非交叠时钟产生电路, 本设计利用电容连接的 MOS 管作为充放电电容, 大大减小了版图的面积. 由于时钟驱动的是大尺寸的电荷泵开关管, 因此不仅要考虑时钟的周期与稳定性, 更要考虑时钟的驱动能力. 电路中增加了  $\text{INV}_1$  与  $\text{INV}_2$  反相器, 在减小静态电流的同时来提高电路的驱动能力.

具体的工作如下: 启动时, 当  $\text{CLK}_2$  时钟为低时, MOS 电容充电  $M_9$  栅端电压逐渐升高,  $\text{INV}_1$ 、 $\text{INV}_2$  输入端电压上升,  $\text{INV}_1$  输出先翻转, 由高到低,  $M_{11}$  管关闭; 经过延时后,  $\text{INV}_2$  翻转,  $M_{10}$  管打开.  $\text{INV}_3$  输入端电压上升,  $\text{CLK}_1$  下降,  $\text{CLK}_2$  上升. 当  $\text{CLK}_2$  时钟升高时, MOS 电容放电, 电压逐渐降低,  $\text{INV}_1$ 、 $\text{INV}_2$  输入端电压下降,  $\text{INV}_2$  输出先翻转, 由低到高,  $M_{10}$  管关闭; 经过延时后,  $\text{INV}_1$  翻转,  $M_{11}$  管打开.  $\text{INV}_3$  输入端电压下降,  $\text{CLK}_1$  上升,  $\text{CLK}_2$  下降. 由此完成了一个周期的工作. 振荡器的输出端采用反相器负反馈电路, 增加电路的驱动能力的同时, 可以去除毛刺, 产生稳定的相位相反占空比  $50\%$  的方波信号. 非交叠电路采用的是常见的以反相器作为延时单元的时钟产生电路, 该电路把 OSC 电路产生的方波信号进行处理, 得到  $C$  与  $D$  高电平不相交叠的时钟信号,  $A$  与  $B$  为低电平不相交叠的时钟信号. 在典型值  $V_{\text{CC}}$  为  $3.3 \text{ V}$  条件下用 Cadence spectre 下仿真, 得到两相非交叠时钟  $A, B, C, D$  波形如图 7 所示, 时钟频率控制在  $4 \text{ MHz}$  左右, 能较快地使 Charge pump 输出到高压, 且不致使功耗过大, 同时减小纹波, 达到稳定输出. 输出频率可以根据需要, 调节电容连接的 MOS 管得到.

### 3 仿真验证结果

本设计基于  $0.6 \mu\text{m}$  CMOS 工艺, 采用 Cadence spectre 仿真工具进行电路设计验证与仿真. 在典型

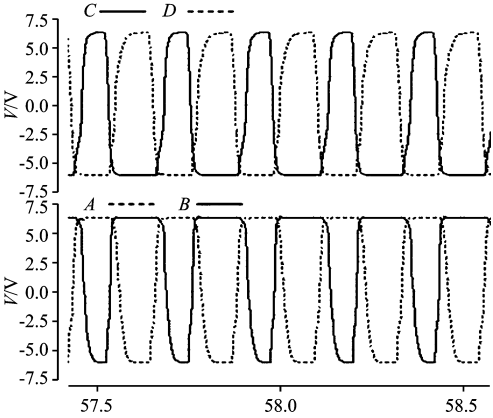


图 7 非交叠时钟仿真波形

的条件下  $V_{cc} = 3.3\text{ V}$ , 温度为  $27^\circ\text{C}$ , 负载电流  $10\text{ mA}$ , 泵电容和输出电容均为  $0.1\text{ }\mu\text{F}$ , 对  $V+$ ,  $V-$  进行仿真验证, 结果如图 8 左侧所示, 在启动  $51\text{ }\mu\text{s}$  前  $V+$  由电源电压逐渐上升,  $V-$  由  $0\text{ V}$  逐渐降低, 在启动  $51\text{ }\mu\text{s}$  后, 输出稳定的  $V+$  为  $6.2\text{ V}$ ,  $V-$  为  $-6\text{ V}$ . 根据电源转换效率公式(8)本次设计电源转换效率大于  $95\%$ , 大大提高了电荷泵的性能. 输出电压纹波大小是影响芯片性能的重要参数指标, 电压纹波的产生是由于负载电容周期性的充放电产生的, 图 8 右侧为输出平稳后  $V+$  的输出放大波形, 可知在对电容周期性充放电的过程中, 输出电压也在周期性的震荡, 震荡的最高幅值  $6.230\text{ V}$ , 最低幅值  $6.215\text{ V}$ , 输出电压纹波仅为  $15\text{ mV}$ .

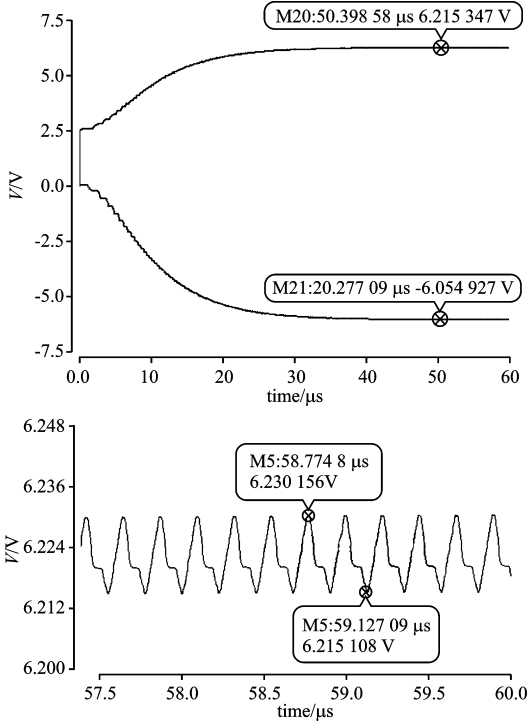


图 8 电荷泵仿真结果波形与电压纹波

在  $2.8\sim 5\text{ V}$  电源电压下电路均可达到设计目标, 其仿真结果与详细参数如图 9 和表 2 所示. 图中波形上方分别标识出驱动电源电压的大小. 考虑到工艺的耐压限制问题仿真最高电压约束在  $5\text{ V}$  内, 但不仅仅  $5\text{ V}$  为最高可工作电压. 由表 2 所示, 在提供电源电压  $2.8\sim 5\text{ V}$  范围内, 基本完成正反相倍压输出的目的, 但是随着电压的升高电路输出纹波增高, 转换效率逐渐减小, 但都是在性能允许的范围内.

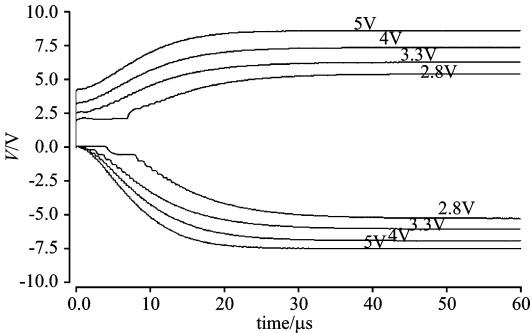


图 9 不同电源电压仿真

表 2 不同电源电压下输出参数对照表

| 电源/V | $V+/\text{V}$ | $V-/\text{V}$ | 纹波/ $\text{mV}$ | 转换效率/ $\%$ |
|------|---------------|---------------|-----------------|------------|
| 2.8  | 5.4           | -5.3          | 13              | 97         |
| 3.3  | 6.2           | -6.0          | 15              | 95         |
| 4.0  | 7.5           | -7.2          | 25              | 94         |
| 5.0  | 8.8           | -7.5          | 40              | 88         |

表 3 为本文电荷泵电路与其他参考文献中电荷泵性能的比较, 本文电荷泵在输出纹波, 转换效率方面相比于其他文献都表现出了良好的性能, 在普通的接口芯片电路中, 典型电源电压  $3.3\text{ V}$  具有最优的正反相倍压性能, 并且在各项指标下都表现良好.

表 3 本文电荷泵与其他文献电荷泵比较

| 参数                | 本文  | 文献[8] | 文献[9] |
|-------------------|-----|-------|-------|
| 工艺/ $\mu\text{m}$ | 0.6 | 0.162 | 0.35  |
| 纹波/ $\text{mV}$   | 15  | 40    | 385   |
| 转换效率/ $\%$        | 95  | 90    | 91    |

4 结束语

本文基于传统电荷泵做了结构上的改进, 设计实现了一种高效低纹波双端输出电荷泵, 经过仿真验证在  $2.8\sim 5\text{ V}$  间均可正常工作, 在典型的  $3.3\text{ V}$  电源下, 达到性能最优. 解决了电荷泵电路输出性能不稳定和转换效率偏低的缺陷, 并达到  $V+$ ,  $V-$  双端输出的目的, 适合在众多接口芯片中使用. 由于电

荷泵达到升压和降压的目的,所以在选择工艺模型时要重点研究工艺的耐压程度与器件是否存在漏电,这在以后的电荷泵电路设计中是要重点关注的问题<sup>[10]</sup>.

## 参考文献:

- [1] SCHIMPF S, BAUR H, FRUEHAUF N. P-135: Dickson charge pumps made of indium gallium zinc oxide thin film transistors on foil substrates[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2017, 48 (1): 1765-1768. DOI: 10.1002/sdtp.12018.
- [2] YANG F, ZHENG Y A, WANG C G, et al. A single-poly EEPROM with low leakage charge pump and peripheral circuits for passive RFID tag in a standard CMOS technology[J]. IEICE Electronics Express, 2017, 14 (10): 20170315. DOI: 10.1587/elex.14.20170315.
- [3] NAVIDI M M, GRAHAM D W. A regulated charge pump with extremely low output ripple[J]. Electronics, 2019, 8 (11): 1293. DOI: 10.3390/electronics8111293.
- [4] KORDETOODESHKI E, HASSANZADEH A. Design of low voltage low power DC-DC converters using adiabatic technique[J]. Journal of Circuits, Systems and Computers, 2018, 27(6): 1850094. DOI: 10.1142/S0218126618500949.
- [5] PENG H, DE PAUW H, BAUWENS P, et al. A monolithic low-power-consumption driver circuit based on a Dickson charge pump for MEMS actuator applications[J]. Solid-State Electronics, 2020(164): 107683. DOI: 10.1016/j.sse.2019.107683.
- [6] ZHU T Z, ZHANG Y N, JI R D. Design of a charge pump for high voltage driver applications based on

0.35  $\mu\text{m}$  BCD technology[J]. Modern Physics Letters B, 2017, 31 (19/21): 1740008. DOI: 10.1142/S0217984917400085.

- [7] ZHANG W J, YANG F, DUAN J B, et al. Design of a new constant voltage output charge pump for MEMS microphones[J]. Research & Progress of SSE, 2013, 33(3): 300-304. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3819.2013.03.020.
- [8] FU X L, PANG Z L, JIA C. Design of a low ripple voltage charge pump for AMOLED display driver[J]. China Integrated Circuit, 2015, 24(7): 37-40. DOI: 10.3969/j.issn.1681-5289.2015.07.008.
- [9] ZHAN Y, HUANG W K, XU J H, et al. Design of charge pump for H-bridge power driver circuit[J]. Microelectronics & Computer, 2014, 31(1): 107-111. DOI: 10.19304/j.cnki.issn1000-7180.2014.01.025.
- [10] YIN F F, WU C Y, LI W C, et al. Design of a novel charge-pump integrated circuit for double output positive and negative double voltage[J]. Journal of Liaoning University (Natural Sciences Edition), 2007, 34 (3): 211-213. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5846.2007.03.006.

## 作者简介:

于云男,(1995-),硕士研究生.研究方向为模拟集成电路设计.

谢亮男,(1983-),博士,副教授.研究方向为ASIC设计、ADC、红外传感方向.

张文杰男,(1986-),博士.研究方向为模拟集成电路设计.

金湘亮(通讯作者)男,(1974-),教授,博士生导师.研究方向为信号处理、CMOS传感器与集成电路设计.

E-mail: xiangliangjin@163.com.

(上接第65页)

- [11] 张成文. 多用户 MIMO-OFDM 下行链路自适应资源分配技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- ZHANG C W. Downlink adaptive resource allocation techniques for multiuser MIMO-OFDM system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.

## 作者简介:

刘策伦男,(1983-),博士,硕士研究生导师.研究方向为电子工程和云存储技术.

罗靖杰(通讯作者)男,(1995-),硕士研究生.研究方向为电子工程. E-mail: 708961943@qq.com.

王芳女,(1995-),硕士研究生.研究方向为电子工程.