

一款基于开关电容的倍压器研究与设计

刘士启¹, 马奎^{1,2,3}, 杨发顺^{1,2,3}

(1. 贵州大学 大数据与信息工程学院, 贵州 贵阳 550025;

2. 半导体功率器件可靠性教育部工程研究中心, 贵州 贵阳 550025;

3. 贵州省微纳电子与软件技术重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 基于开关电容的倍压器又称为电荷泵, 设计将电荷泵集成到一颗芯片中。该芯片能够在 4 V 至 20 V 的输入范围内工作, 并提供 7 V 至 38 V 的输出, 提供超过 10 mA 的输出电流。电路采用电荷泵结构实现倍压, 该电路的特点是无需电感, 就可实现对输入电压的倍增, 消除了电磁干扰的影响。空载情况下电源电流最大不超过 12 mA。另外该电路采用双极型工艺制造, 不易发生闩锁。

关键词: 开关电容; 电荷泵; 倍压器; 双极型

中图分类号: TN402

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211975

中文引用格式: 刘士启, 马奎, 杨发顺. 一款基于开关电容的倍压器研究与设计[J]. 电子技术应用, 2022, 48(3): 49-53.

英文引用格式: Liu Shiqi, Ma Kui, Yang Fashun. Research and design of a switched capacitor voltage doubler[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(3): 49-53.

Research and design of a switched capacitor voltage doubler

Liu Shiqi¹, Ma Kui^{1,2,3}, Yang Fashun^{1,2,3}

(1. College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Semiconductor Power Device Reliability Engineering Research Center of Ministry of Education, Guiyang 550025, China;

3. Key Laboratory of Micro-Nano-Electronics of Guizhou Province, Guiyang 550025, China)

Abstract: The switched capacitor voltage doubler is called charge pumps. It is integrated into a chip. Capable of operating from a 4 V to 20 V input, it provides ± 7 V to ± 38 V output. Output currents of over 10 mA are available. This circuit adopts charge pump structure to realize voltage doubling. The characteristic of the circuit is that the input voltage can be doubled without inductance, and the influence of electromagnetic can be eliminated. The maximum power supply current under no load is not more than 12 mA. Manufactured in bipolar technology, that is not susceptible to latchup.

Key words: switched capacitor; charge pumps; voltage doubler; bipolar

0 引言

直流电压变换可分为两大类: 基于电感的电压变换电路和基于电容的电压变换电路, 这两种电路使用的变压器件分别是电感和电容^[1]。基于电感的电压变换电路虽然具有较高的变换效率, 但是电路的体积很大, 难以集成在芯片中, 而且由于使用了电感, 在电路工作过程中造成的电磁干扰问题相当严重, 同时电感式变压电路的造价也相对较高, 一般应用于较大型设备的变压场合^[2]。而基于电容的电压变换电路就是电荷泵, 电荷泵电路只占用很小的芯片面积, 成本较低, 基本不存在电磁干扰现象, 电荷泵在小型电子设备中的应用很广泛^[3]。电荷泵既可用于芯片内部电路供电, 也可用于芯片外部模块供电。在芯片内部的某些模块, 其所需的输入电压可能不是电源电压, 这时就需要电荷泵把电源电压变换成模块

所需的电压, 使其正常工作, 例如在存储芯片中, 内部可能需要 40 V 的高压, 电荷泵可把电源电压泵升到这个电压值来满足需求^[4]; 而另一方面, 电荷泵电路本身可以封装成一个独立芯片, 它的输出电压可用于数码相机、平板电脑、音乐播放器等各类手持便携设备, 来为这些设备提供稳定的电压^[5]。在电荷泵用于驱动外部电子设备的应用场合中, 如果电荷泵只需要提供较小的驱动电流, 那么用于泵升电压的电容值比较小, 占用面积不大, 就可以集成在芯片内部^[6]。

1 基于开关电容的倍压器电路结构设计

本文所设计基于开关电容的倍压器框图如图 1 所示, 主要包含偏置电路、振荡器、驱动电路、开关电路四个模块。

偏置电路由多支路镜像电流源及有源负载构成, 提

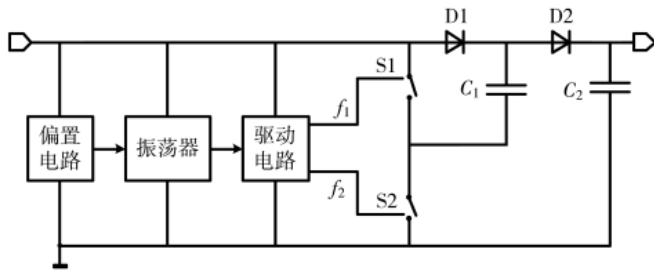


图1 开关电容倍压器系统框图

供稳定的偏置电流；振荡器采用张弛振荡器电路结构，振荡器产生两组矩形波信号分别控制 S1 和 S2 两组开关。驱动电路负责提供开关管导通所需的驱动电流。开关电路由两个二极管和两个开关管组成，利用二极管的单向导通可以作为开关使用，两个开关管 S1、S2 由两组信号 F1、F2 同时控制，F1 控制 S1，F2 控制 S2，导通的时序是 S2 先导通，电源为 C1 充电，然后 S2 断开，S1 导通，泵电容 C1 和 VDD 串联得到倍增的 +V_{OUT} 实现对输入电压的倍增。

1.1 偏置电路

偏置电路的结构如图 2 所示。

此条支路采用串接电流镜的结构，负责产生一个基准电流，并将此基准电流通过电流镜复制到后面的电路中，为之后的电路提供合适的偏置电流。

通过第一条支路，可以得到式子：

$$V_{in} - I_{REF} \cdot R_5 - V_{Q1(on)} - V_{Q30(on)} - V_{CE(Q29)} - \frac{1}{2} I_{REF} \cdot R_{26} = 0$$

1.2 振荡器

张弛振荡器电路结构如图 3 所示。

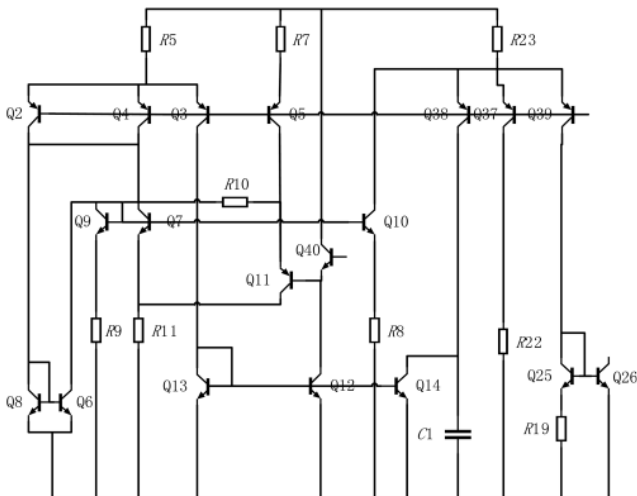


图3 振荡器电路结构

本电路中的 Q40 是电容的放电管，Q12、Q38 是电流镜做有源负载，Q38、Q14 为充电管，两者均为电容充电。

C2 在零状态下接通电源，C2 充电的时长由 Q38 提供的电流大小决定，电容 C2 上的电压逐渐增大，当 UC 逐渐达到 Q40 开启电压时，Q40 开启，C2 经 Q40 放电，放电快慢取决于 Q12 提供的电流大小。

当电容 C2 上的电压通过放电减小到小于 Q40 的导通电压时，eb 之间电阻增大，Q40 恢复阻断状态，C2 又开始充电重复上述过程。正是因为 C2 不停地充放电，故 UC 呈现规则的锯齿波。

Q40 基极的锯齿波经射极跟随器传到 Q11 基极，然后再经过一级射极跟随器到达 Q11 发射级完成波形采样。采样后的波形送入由 R10、Q6、Q7、Q8、Q9、Q10 组成的整形网络，将三角波转化成方波。

充电过程：当 Q8 集电极为高电平时，Q6 开启，Q6 集电极电流与 R10 阻值相乘，三角波的上升沿通过 R10 被拉低成低电平，Q6 集电极会输出低电平，Q10 基极也为低电平，Q10 集电极输出高电平，Q38 开启电容 C2 充电。

放电过程：Q11 发射级输出的三角波为下降沿时，Q9 的 BE 结将下降沿拉成恒定 800 mV 左右的高电平，Q9 集电极为高电平，Q7 集电极输出低电平从而 Q10 集电极为低电平，Q38 关闭，电容充电终止开始放电。

占空比影响因素：振荡器的占空比由充放电时间共同决定，只有当充放电的时间常数一致时占空比才会达到 50%^[7]。电容通过 Q38、Q14 完成充电、Q40 放电。

$$I_{R23} = I_{R6}$$

$$I_{CQ10} = 0.5 I_{R23}$$

$$I_{CQ37} + I_{CQ38} + I_{CQ39} = I_{CQ2} + I_{CQ3} + I_{CQ4} = 0.5 I_{R23}$$

$$I_{CQ3} = I_{CQ13} = I_{CQ12} = 2 I_{CQ14}$$

$$I_{CQ3} = 2 I_{CQ38}$$

$$\text{推出：} I_{CQ12} = I_{CQ38} + I_{CQ14}$$

正是因为 $I_{CQ12} = I_{CQ38} + I_{CQ14}$ ，充放电电流一致所以占空比为 50%，所以通过调节 Q12、Q14 和 Q38 的 m 数调节振荡器占空比，也可以通过调节 R8 阻值来调节 Q10 集电极支路上的电流，以此来影响 Q38 的电流^[8]。

1.3 驱动及开关电路

开关 S1 及 S1 的驱动电路如图 4 所示。

Q24 的驱动电流主要由 Q26 镜像电流源提供，所以 Q26 的 m 数会影响开关 Q24 的驱动能力，驱动电流过小的话会导致 Q24 的 CE 结压降太大，从而引起 VO+ 不达标^[9]。如果 Q26 的 m 数设得太大则会导致电源电流增大，而且 VO+ 也不会很明显增大，因为如果管子已经饱和，再去增大 Q24 的基级电流，那么对减小 Q24 的 CE 压降会毫无帮助，反而会增加整体功耗。Q26 提供整体的驱动电流，Q16 负责镜像驱动电流，在此环节可以微调驱动电流，Q19 负责对驱动电流进行放大，可以通过调节 Q19 的 m 数对放大倍数进行微调，经过 Q19 放大

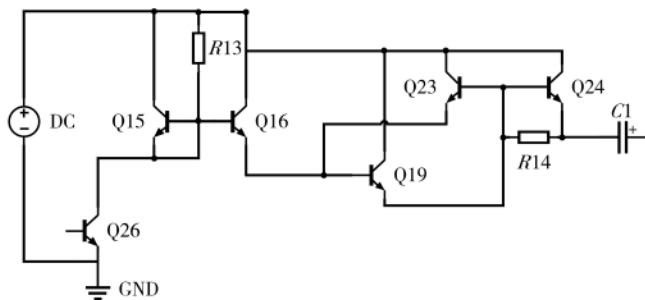


图4 S1驱动及开关电路

的驱动电流一路流经 R_{14} , 另一路流进 Q_{24} 基级, 所以如果想要控制整体功耗的话, 可以把 Q_{26} 的基级电流调到一个合适的值, 然后通过调节 R_{14} 、 R_{13} 以及 Q_{13} 的 m 数来调节驱动电流以满足 Q_{24} 的饱和条件^[10]。

S1 导通条件: 设 Q_{24} 基极电流为 X , 开关 S2 及 S2 的驱动电路如图 5 所示。

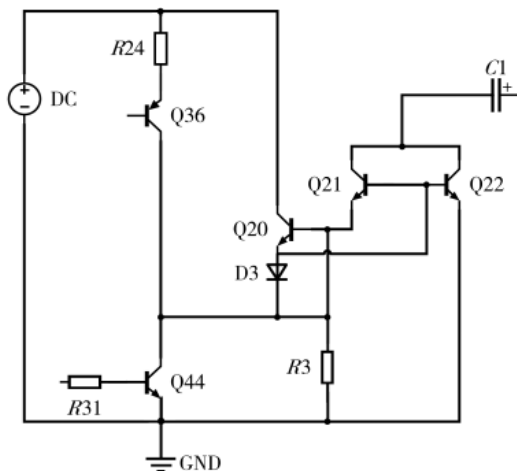


图5 S2驱动及开关电路

Q_{44} 控制开关 Q_{22} 的导通、关断, Q_{36} 负责提供 S2 导通所需的驱动电流, 然后经 Q_{20} 放大送到 Q_{22} 基级, 为 Q_{22} 提供驱动电流。可以调节 R_{24} 的电阻大小来控制

S2 整体的驱动电流, R_{24} 越小, 驱动电流越大, 此外还可通过调节图 5 中 R_3 的大小来对驱动电流进行微调。 R_3 阻值越大, 流入 Q_{22} 基级的电流越大。

2 基于开关电容的倍压器的仿真验证

本文基于中科渝芯 40 V 双极型工艺完成电路设计并利用 Cadence 软件对电路进行仿真。其整体结构如图 6 所示。

2.1 空载仿真

2.1.1 5 V 空载仿真

在 5 V 空载情况下, 输出电压可以达到 8.95 V 左右, 仿真结果见图 7。

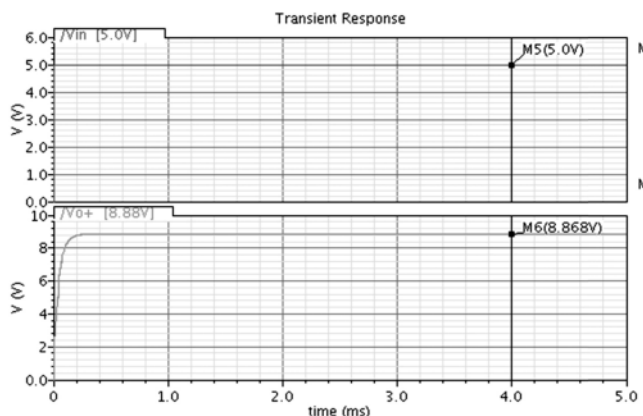


图7 5 V空载仿真结果

2.1.2 11 V 空载仿真

11 V 空载情况下, 输出电压可以达到 20.69 V 左右, 仿真结果见图 8。

2.1.3 20 V 空载仿真

20 V 空载情况下, 输出电压可以达到 38.18 V 左右, 仿真结果见图 9。

2.2 带负载仿真

2.2.1 $V_{in}=5$ V, 输出带 20 mA 负载仿真

输入电压为 5 V, 正端输出电流可以达 22.78 mA。仿真结果见图 10。

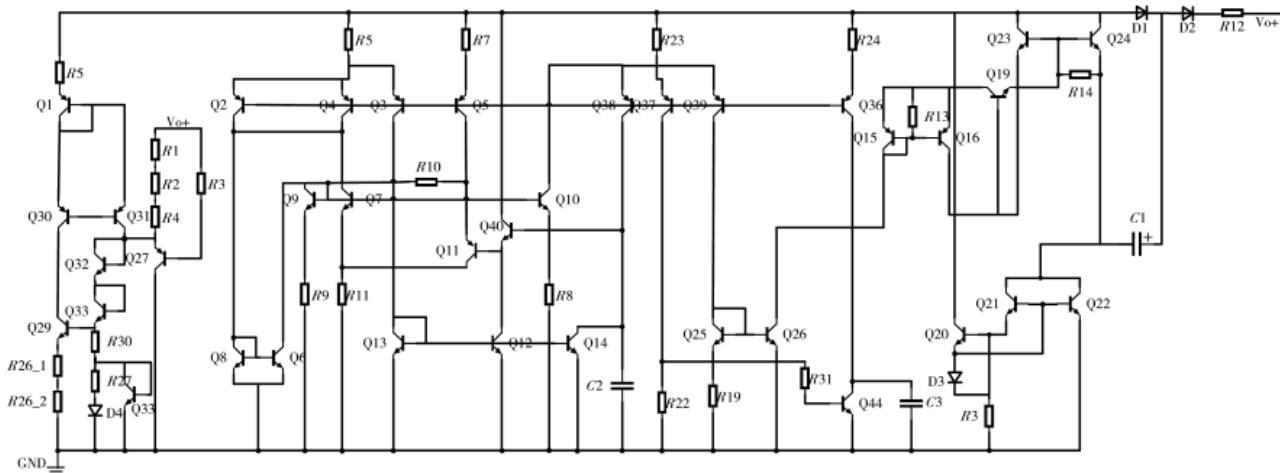


图6 倍压器的整体电路结构

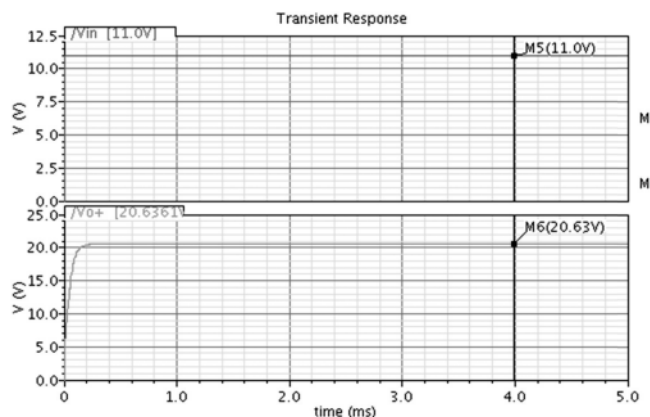


图8 11 V 空载仿真结果

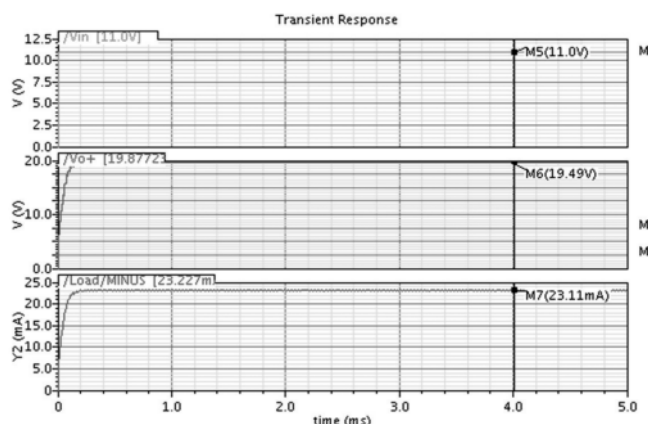


图11 $V_{in}=11\text{ V}$, 输出带 20 mA 负载仿真

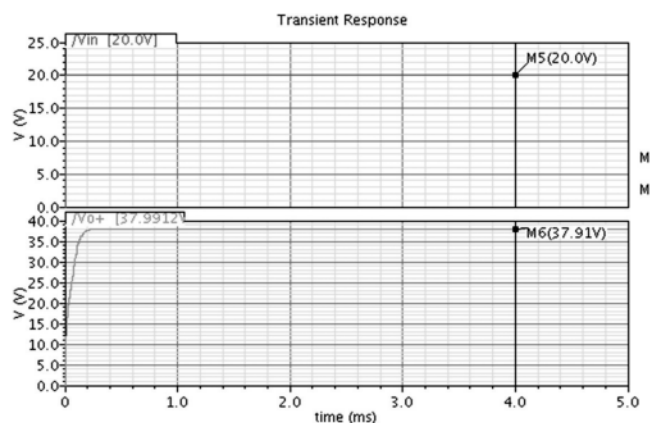


图9 20 V 空载仿真结果

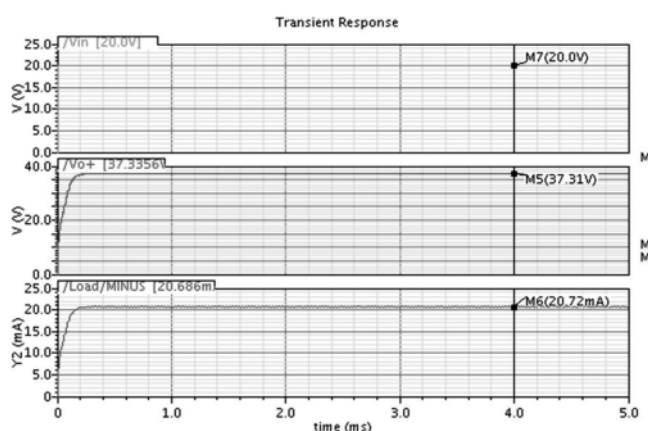


图12 $V_{in}=20\text{ V}$, 输出带 20 mA 负载仿真

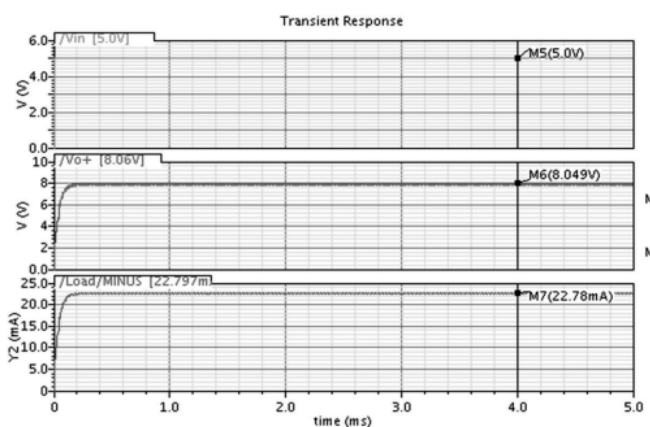


图10 $V_{in}=5\text{ V}$, 输出带 20 mA 负载仿真

2.2.2 $V_{in}=11\text{ V}$, 输出带 20 mA 负载仿真

输入电压为 11 V, 正端输出电流可以达 23.13 mA。仿真结果见图 11。

2.2.3 $V_{in}=20\text{ V}$, 输出带 20 mA 负载仿真

输入电压为 20 V, 正端输出电流可以达 20.72 mA。仿真结果见图 12。

2.3 电源电流仿真

DC-DC 还有一个重要的指标参数就是功耗, 设定的目标参数是输入电压为 4 V 时, 电源电流最大不超过 12.5 mA; 输入电压为 10 V 时, 电源电流最大不超过

30 mA。图 13 是 4 V 空载时的电源电流大小, 电源电流最大为 5.23 mA。图 14 是 10 V 空载时的电源电流仿真, 从图中可以看出电源电流最大为 11.34 mA。4 V 空载和 10 V 空载电源电流均达标。

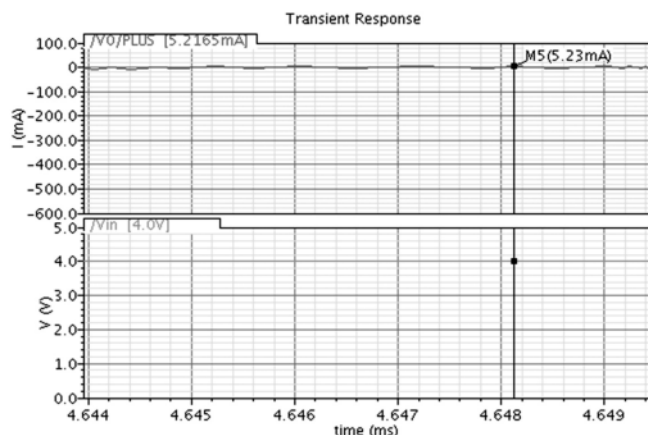


图13 4 V 空载时, 电源电流仿真

2.4 输出电压纹波仿真

4 V 空载时, 输出电压纹波如图 15 所示, 仅有 6 mV。纹波大小取决于开关频率, 开关频率越慢, 输出电压的纹波就越大^[1]。但也不是开关频率越快越好, 开关频率越

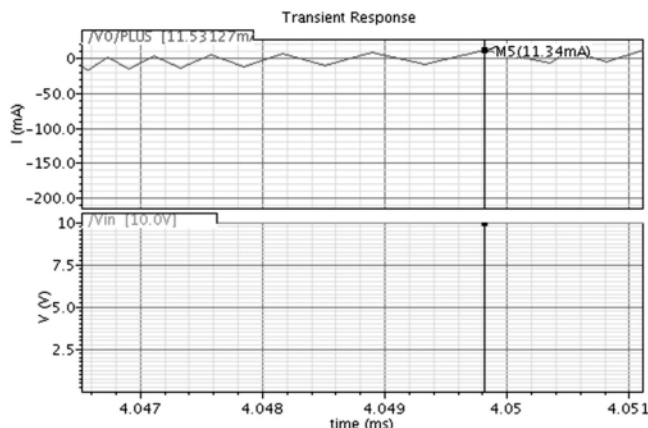


图 14 10 V 空载时, 电源电流仿真

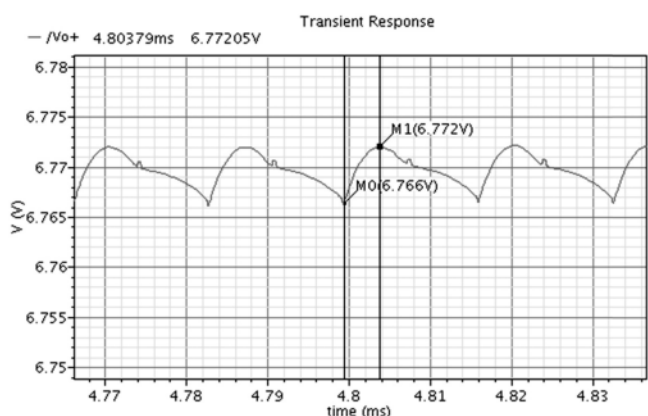


图 15 4 V 空载时输出电压的纹波大小

快, 则开关管损耗越大, 会造成芯片功耗变大, 所以功耗和纹波大小是一对需要权衡的参数^[12]。

2.5 开关电容倍压器的应用电路

开关电容倍压器的应用电路极为简单, 如图 16 所示, 仅需外接两个电容, 即可实现对输入电压的倍增, 且无电磁感应效应^[13]。电容 $C1$ 为泵电容, 负责储存电荷, 也是电压能否实现倍增的关键^[14]。电容 $C5$ 为输出电容, 作用为滤波。电荷泵实现电压倍增的方式虽然比较简单, 但是缺点是纹波较大, 故在输出端加上滤波电容, 该电容越大, 纹波越小, 用户可以根据应用电路对纹波的要求来自行确定输出电容的容值大小^[15]。

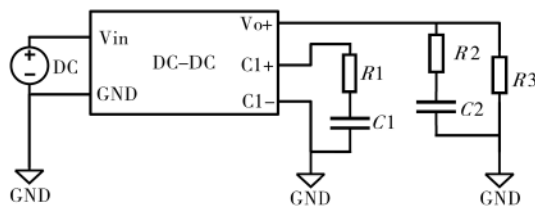


图 16 开关电容倍压器的应用电路

3 结论

本文研究并设计了基于开关电容的倍压器, 该芯片仅需两个外部电容即可实现对输入电压的倍增。电压输

入范围为 4 V 到 20 V, 最大可带 20 mA 负载, 空载纹波为 6 mV 左右, 该电路无需电感, 可以避免电磁干扰效应。经过仿真验证该芯片可以在 $-55^{\circ}\text{C} \sim 125^{\circ}\text{C}$ 的环境下工作, 其带负载能力、输出电压、电源电流都是达标的。

参考文献

- [1] 叶强, 来新泉, 许录平, 等. 基于可调电荷泵的双模式高压开关控制器[J]. 固体电子学与进展, 2009, 29(1): 83-88.
- [2] 王立志, 陈治明, 赵敏玲, 等. 基于有源电容倍增器的新型电荷泵 DC-DC 变换器[J]. 电子学报, 2004, 32(5): 845-847.
- [3] 韩兴成. 电荷泵电路的分析、设计和提高性能的研究[J]. 固体电子学与进展, 1999(3): 305-313.
- [4] 高峰, 谭传武, 张昌凡. 一种 PFM 电荷泵充放电系统的驱动电路设计[J]. 电子世界, 2012(11): 53-54.
- [5] 刘晓燕, 叶青. CMOS 电荷泵的结构设计与分析[J]. 科学技术与工程, 2006(13): 1793-1797.
- [6] 马铭磷, 蔡兴龙. 电荷泵拓扑和设计策略概述[J]. 邵阳学院学报(自然科学版), 2016, 13(4): 26-31.
- [7] 方佩敏. 电荷泵电路的电压调节结构及工作原理[J]. 电子质量, 2002(2): 41-43.
- [8] 丁德彬, 杨依忠, 张章, 等. 基于电荷泵的低压启动高效率 Boost DC/DC 变换器设计[J]. 电子器件, 2013(2): 211-216.
- [9] 谭传武, 汤琼, 刘罗华, 等. 一种单片低功耗电荷泵电源管理电路的设计[J]. 微电子学, 2012(1): 67-71.
- [10] 翟艳男. 高速片上 CMOS 电荷泵研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2008.
- [11] 徐志伟, 肖斌, 闵昊, 等. 适合低功耗工作的 MOS 电荷泵[J]. 微电子学, 2000, 30(2): 136-140.
- [12] 熊富贵, 罗萍, 李肇基, 等. PSM 控制电荷泵电路[J]. 微电子学, 2004, 34(2): 125-127.
- [13] HUANG M H, FAN P C, CHEN K H. Low-ripple and dual-phase charge pump circuit regulated by switched-capacitor-based bandgap reference[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(5): 1161-1172.
- [14] PALUMBO G, PAPPALARDO D. Charge pump circuits: an overview on design strategies and topologies[J]. Circuits & Systems Magazine IEEE, 2010, 10(1): 31-45.
- [15] Shao Chiyi. Charge pump regulator with small ripple output signal and associated control method, US20150288278[P]. 2015.

(收稿日期: 2021-07-23)

作者简介:

刘士启(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 模拟集成电路设计。

马奎(1985-), 通信作者, 男, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向: 半导体集成技术、模拟集成电路设计及应用、半导体芯片的可靠性, E-mail: kma@gzu.edu.cn。

杨发顺(1976-), 男, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向: 半导体功率器件与功率集成技术、半导体集成电路设计。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所