

引用格式:智玉欣,蔡小五,赵海涛,等. 一种基于浮地结构的高边驱动电路[J]. 微电子学与计算机,2021,38(1):7-11. [ZHI Y X,CAI X W,ZHAO H T, et al. High-side driving circuit based on floating structure[J]. Microelectronics & Computer, 2021,38(1):7-11.]

一种基于浮地结构的高边驱动电路

智玉欣^{1,2,3},蔡小五^{1,2,3},赵海涛^{1,3},夏瑞瑞^{1,2,3},

刘海南^{1,3},罗家俊^{1,2,3},叶甜春^{1,2}

(1 中国科学院 微电子研究所,北京 100029;2 中国科学院大学,
北京 100049;3 中国科学院 硅器件技术重点实验室,北京 100029)

摘 要: 本文介绍了一种采用浮地结构的高边功率驱动电路,包括输入级电路、稳压电路、浮地产生电路以及基于电荷泵驱动电路. 针对传统驱动电路中存在的信号干扰、信号串扰问题、栅击穿以及稳压源电路提出了一种新的解决方法以及电路设计方法,极大提高了高边功率驱动电路的稳定性. 基于 BCD 工艺,单电源电压 7V~40V 情况下的仿真结果表明:在 2MHz 振荡器频率下,浮地电路可正常工作,浮地上的纹波电压变化小于 0.03V;可以对干扰信号进行有效过滤,具有较强的防误触发能力. 此新型浮地电路以及稳压源电路可很好的应用于高边功率驱动电路.

关键词: 浮地结构;片内稳压源;驱动电路;信号串扰

中图分类号: TN432

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2021)01-0007-05

High-side driving circuit based on floating structure

ZHI Yu-xin^{1,2,3},CAI Xiao-wu^{1,2,3},ZHAO Hai-tao^{1,3},XIA Rui-rui^{1,2,3},

LIU Hai-nan^{1,3},LUO Jia-jun^{1,2,3},YE Tian-chun^{1,2}

(1 Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences,Beijing 100029,China;

2 University of Chinese Academy of Sciences,Beijing 100049,China;

3 Key Laboratory of Silicon Device Technology,Chinese Academy of Sciences,Beijing 100029,China)

Abstract: This paper introduces a high-side power drive circuit using a floating structure, including an input stage circuit, a voltage stabilization circuit, a floating generation circuit, and a charge pump-based drive circuit. A new solution and circuit design method are proposed for the ground signal interference, signal crosstalk problem and voltage regulator source circuit existing in the traditional drive circuit, which greatly improve the stability of high-side power drive circuits. Based on BCD process, the simulation results under the condition of single power supply in the range of 7V ~ 40V show that the floating circuit can work normally at the frequency of 2MHz oscillator, and the ripple voltage variation on the floating ground is less than 0.03V. Moreover, it can filter the interference signal effectively, and has a strong ability to prevent error triggering. This new floating circuit and voltage regulator circuit can be well used in high side power drive circuit.

Key words: floating structure;on-chip voltage regulator; drive circuit; signal crosstalk

1 引言

智能功率集成电路 (SPIC; Smart Power IC) 于二十世纪七十年代后期提出, 主要应用于军事通讯、汽车电子、工业制造自动化以及航空航天等领域; 此类电路主要采取 BCD 工艺, 一般由驱动控制模块、保护电路以及外围接口模块三部分组成^[1]. 驱动电路是该类芯片的核心部分, 此电路又可分为高边驱动与低边驱动, 低边驱动常常采用 Buffer 实现; 高边功率管既可以采用 N 沟道器件也可以采用 P 沟道器件, 由于电子迁移率大于空穴迁移率, 为了减小小芯片面积常常采用 N 沟道器件作为高边开关, 因此研究基于 N 沟道开关管的高边驱动电路很有必要.

当采用 N 沟道器件作为高边开关管时, 为了保证在正常工作时开关管完全打开, 需要高边管的栅极电压大于电源电压^[2]. 常见的驱动电路有自举电路和电荷泵电路, 在芯片开关频率不高且负载电容很大时, 常常采用电荷泵作为驱动电路. 当电源电压变化范围很大时, 直接将电源电压作为电荷泵时钟端口的高电平电压一方面浪费功耗, 另一方面有可能导致栅极的击穿. 本文提出了一种基于浮地结构的电荷泵驱动电路, 在基本电荷泵的基础上做些改进, 可以实现电源电压很大范围内变化时, 始终可以保证功率管栅极大于电源电压 5 V. 本文的创新点在于: (1) 提出一种结构简单且实用的浮地电路结构, 并对此进行电路分析, 该电路可应用于高边电荷泵的驱动电路; (2) 集成片内稳压源, 在输入电压范围很大时, 始终输出一个稳定的低电平电压源, 可作为片内低压源; (3) 一种新型电平移位器, 防止高边功率管栅极击穿.

2 系统分析

2.1 传统电荷泵驱动电路

图 1 是一个常见采用 N 沟道器件作为开关管的电荷泵驱动电路. EN 使能有效时, 输入 IN 控制功率管栅极的电位, 进而控制其通与断. 通常采用基于 LDO 结构的稳压结构产生低压源, 为低压电路提供所需要的电压. 其工作过程大致如下: (1) 输入低压信号通过电平转换器产生所需要的高压信号, 控制电路中电荷泵的开关; (2) 输入经施密特触发器后控制振荡器, 进而控制电荷泵的工作与否; (3) 电荷泵给功率管栅极充电至所需电压, 控制功率管的通与断.

该电路在正常工作时存在一些弊端: (1) 片内集

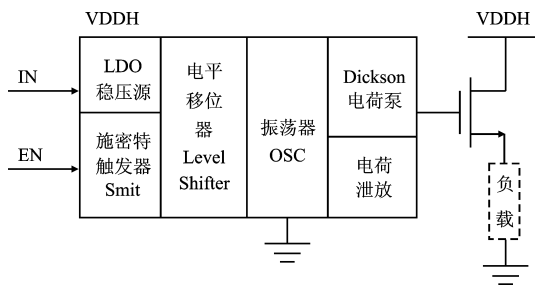


图 1 传统电荷泵驱动电路框图

成 LDO 结构, 大大增加设计的复杂度与芯片的设计面积; (2) 由于采用实地结构, Dickson 电荷泵在倍压工作时, 电荷泵的稳定输出电压为电源电压的整数倍, 在电源电压很大时, 会超过栅极的击穿电压, 限制了电源电压的范围, 灵活性降低; (3) 采用传统的电平移位电路, 当电源很大时, 同样会击穿移位电路 PMOS 管的栅极, 这同样大大限制了电源电压的范围; (4) 由于采用实地结构, 电荷泵的时钟信号会对地信号产生干扰.

2.2 本文提出的系统结构

为了克服传统基于电荷泵驱动电路中存在的问题, 对上述系统中的电路进行改进, 可以在简化电路结构的情况下改善电路的性能, 拓宽电路的应用范围, 具体的电路系统结构如图 2 所示.

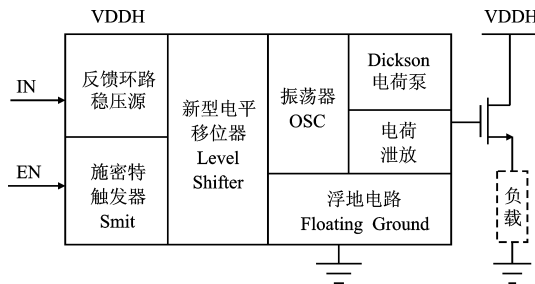


图 2 新型电荷泵驱动电路框图

对照传统驱动电路, 此结构改进之处在于: 将图 1 电路中的 LDO 模块和经典电平移位模块换成反馈环路稳压源和新型电平移位模块, 并且采用浮地结构, 可以大大提高电路的应用范围与灵活性, 在电源电压 7~40 V 变化时, 电路仍可以稳定地工作.

2.2.1 反馈环路稳压源

电源电压在 7~40 V 变化时, 为了产生一个 5 V 稳定的低电源电压供低压电路工作, 采取反馈稳压源结构, 其中 M_1 与 M_2 为高压管子, V_{ds} 可承受 40 V 电压, 其余管子为 5 V 低压 MOS 管^[3]. 该电路的电路图如图 3 所示.

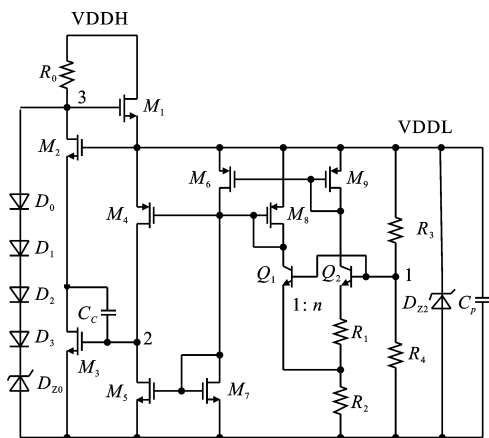


图3 一种反馈稳压源电路结构

该电路中的两个双极性晶体管 Q_1 、 Q_2 与 R_1 组成等效跨导输入级,其等效跨导分别为 G_{m1} 、 G_{m2} ,且 $G_{m1} > G_{m2}$ [3],推导见式(2) ~ (7),节点1处的电压为经过补偿后具有零温度系数的电压,见式(7)。在B点断开环路,当VDDL波动时,节点1电压的波动引起节点3电压的变化可以由式(1)表示:

$$A_{v0} = -(G_{m1} - G_{m2})(r_{o4} || r_{o6})g_{m7} (R_5 || g_{m8}r_{o8}r_{o7}) \quad (1)$$

节点3电压的变化引起1电压的反向变化,整个环路形成负反馈从而稳定输出端的VDDL电平,电容 C_c 用来维持整个环路的稳定性,防止形成正反馈, C_c 的大小对电源突然上电时VDDL稳定所需的时间有影响。

$$I_C = nI_o \exp(V_{BE}/V_T) \quad (\text{BJT 电流方程}) \quad (2)$$

$$g_m = dI_C/dV_{BE} = I_C/V_T \quad (3)$$

$$G_{m1} = g_m \quad (4)$$

$$G_{m2} = 8g_m/(1 + 8g_mR_1) = g_m/(1/8 + g_mR_1) \quad (5)$$

在 $g_mR_1 > 7/8$ 时:

$$G_{m1} > G_{m2} \quad (6)$$

$$v_1 = 2R_2V_T \ln n/R_1 + V_{BE1} \quad (7)$$

2.2.2 新型电平移位器

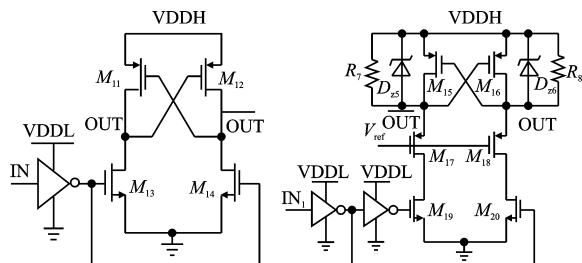
图4(a)是常见的电平移位器,在输入IN在0~VDDL变化时,OUT在0~VDDH之间变化,当VDDH很大时, M_{11} 与 M_{12} 栅源电压会超过其击穿电压,这限制了该类电平转换电路的应用范围。

图4(b)是本文提出的一种新型电平移位器,可以很好克服传统电平转换电路中存在的问题。其中的 V_{ref} 是图4(a)点的直流偏置电压,其值恒为 $(VDDH - 6)V$,在输入信号 IN_1 为1时, M_{15} 管关闭,由 D_{25} 、 M_{17} 、 R_7 与 M_{19} 组成的左支路电路导通,

流经的电流 I_{DS19} 由 D_{25} 、电阻 R_7 以及 M_{17} 决定,OUT端的电压表示为:

$$V_{OUT} = \sqrt{\frac{2I_{DS19}}{\mu C_{ox}(\frac{W}{L})_{17}}} + V_{ref} + |V_{thp}| \quad (2)$$

在 $IN_1 = 1$ 时,OUT端的电压由流经该支路的电流 I_{DS19} 与 M_{17} 管的宽长比 $(W/L)_{17}$ 决定,可以适当调节其参数,限制OUT的最低电压不低于 $(VDDH - 5)V$,防止 M_{15} 与 M_{16} 管发生击穿;同时使OUT端的最高电压不超过 $(VDDH - |V_{thp}|)$,保证可以打开后续电荷泵的开关。在 $IN = 0$ 时, M_{20} 管导通, M_{19} 关闭,从 M_{17} 源极向下看到的电阻趋向无穷大,OUT端输出VDDH高电压,可以保证关闭后续电荷泵的开关。该新型电平移位电路适用于电源电压变化范围很大的情况,大大拓宽了该电路的应用范围[6]。



(a) 传统 Level Shifter 结构 (b) 本文提出的新型结构

图4 两种电平移位电路

2.2.3 OSC 和 CHP 电路

为了使N沟道功率管完全打开,需要将功率管栅极提高到 $(VDDH + 5)V$ 的电压[8]。振荡器与电荷泵电路如图5和图6所示,其中振荡器为双通道输入,为了防止输入信号由于外界干扰而发生误启动或者误停止,电荷泵输入端利用延时电路来消除误触发;电荷泵采取二阶 Dickson 电荷泵。电路在VDDH与FGND电压间工作,VDDH与FGND电压差为5V。

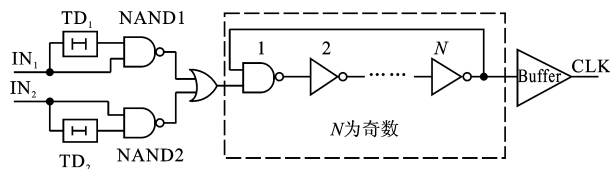


图5 带有误触发延时单元的OSC

对于振荡器电路,只有在 $IN_1 = IN_2 = 5V$ 时,振荡器处于锁存状态,只要 IN_1 与 IN_2 存在低电平时,振荡器就工作。当开始工作时,以 IN_1 为例,如果输入由于干扰(如:EMI干扰等)出现短暂时间的错

误信号,会使得 IN_1 出现短暂的高电平,但是由于延时单元 TD_1 的存在, $NAND_1$ 的输出状态不会发生改变,振荡器仍然可以正常工作,提高了电路的抗干扰能力. 电荷泵的转移电容通常比较大,为了提高时钟信号的驱动能力,在转移电容与振荡器之间加入 Buffer, Buffer 电路及二阶 Dickson 电荷泵电路如图 6 所示^[7,9].

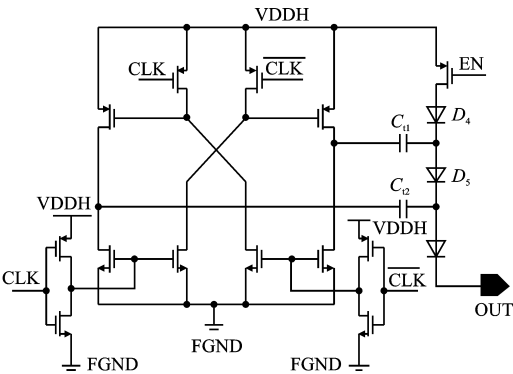


图 6 带有 Buffer 电路的二阶 Dickson 电荷泵

电荷泵给负载电容充电至所需电压消耗的时间由转移电容 C_{11} 和 C_{12} 的大小,振荡器频率以及负载电容的大小有关,可根据需要调节其参数达到所需的要求,在此就不再赘述.

3 系统仿真与分析

基于 BCD 工艺模型,采用 Cadence Virtuoso 进行仿真验证,关键仿真结果如表 1.

表 1 不同电源电压下稳压源输出电压

温度	7 V	10 V	18 V	24 V	40 V
-40℃	4.998	5.027	5.038	5.043	5.127
27℃	4.960	4.977	5.000	5.004	5.010
125℃	4.985	4.996	5.010	5.024	5.100

-40℃~125℃变化时,在 $VDDH$ 变化时, VDL 输出具有温度补偿效果.

在振荡器工作在 2 MHz 频率下,浮地 FGND 上的直流电压为 19 V,电压波动在 $(-0.02 \sim +0.04)$ V 范围内,且其波动频率与振荡器频率一致(峰峰值间隔为 500 μ s),很好地验证了前面的推导. 该电路结构可以防止低压管的击穿,以及对实地电压的影响,可防止地电压对主体电路的信号串扰,如图 7 所示.

电平转换低电压输入在 0~5 V,可以将该低电平转换为 24~19 V 电压,限制了转换的低电平电压始终低于电源电压 5 V,可以防止薄栅器件栅极的

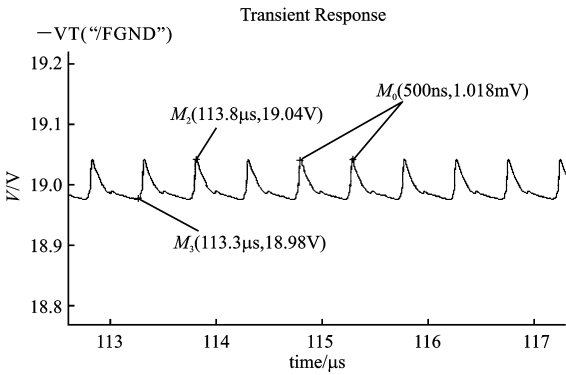


图 7 $f=2\text{ MHz}$, $VDDH=24\text{ V}$, V_{FGND} 电压示意图
击穿,如图 8 所示.

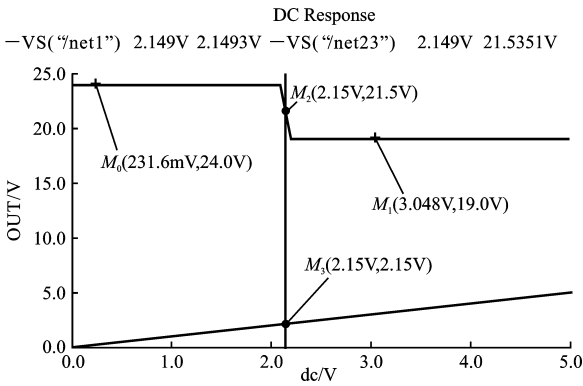
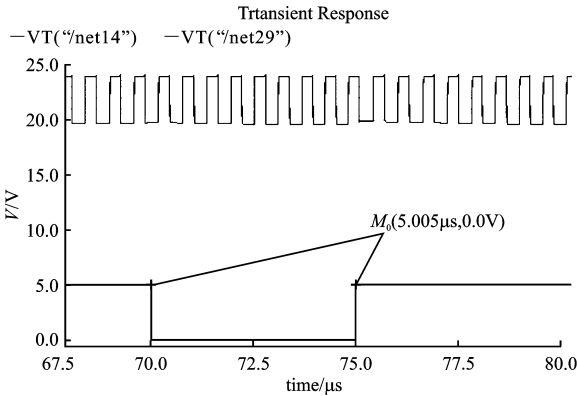


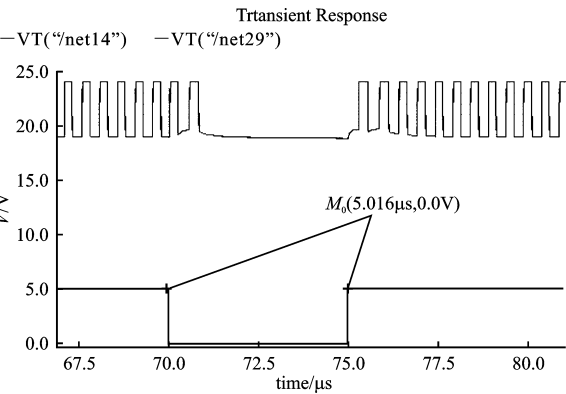
图 8 新型 Level Shifter 电平变换图

在振荡器正常工作时,由于干扰使输入信号产生 5 μ s 的低电平时($TD>5\text{ }\mu$ s),在有抗干扰电路时(图 9(a)),输出振荡器仍然可以正常工作;图 9(b)是不存在抗干扰延时电路时的电路仿真图,可见其并不能有效滤除干扰信号.

表 2 是将该电路与文献中电路性能做了些比较,其大多数性能以及创新点优于引用文献. 其中文献[8]为双电源供电,驱动电路与功率管分别用 15 V 电压与 600 V 电压供电.



(a) 存在抗干扰电路时振荡器波形



(b)不存在抗干扰电路时振荡器波形

图 9 荡器输出时域图

表 2 性能比较

参数	文献[8]	文献[9]	文献[7]	本文
工艺/ μm	1	0.35	—	0.25
电源电压/V	15 600	4.7~52	6~32	4.5~60
升压电路结构	自举电路	一级 Dickson	二级 Dickson	二级 Dickson
稳压源结构	不需要	简单	复杂	简单
电平移位器	经典结构	经典结构	未涉及	新型移位器
是否有抗干扰	是	否	否	是

注:文献[8]为双电源供电,低边电源电压为 15 V,高边为 600 V.

4 结束语

本文提出的一种采用浮地结构的高边功率驱动电路,相对于传统的电路而言,具有很好的抗干扰能力;由于采取了一种新型浮地结构,可以很好地防止对实地信号的干扰,在 2 MHz 频率下,浮地纹波电压不超过 0.03 V;由于采用了反馈稳压源电路以及新型电平移位电路,可以大大拓宽电源电压的范围,在 7~40 V 电源电压输入下,稳压源输出稳定 5 V 低电压,在 0~5 V 输入下,新型电平移位电路输出($V_{DDH} \sim (V_{DDH} - 5 \text{ V})$)电压,很好地防止了薄栅器件的栅极击穿.

参考文献:

[1] LEE J W, CHANG Y F, HSU C W, et al. Novel isolation ring structure for latch-up and power efficiency improvement of smart power ICs[C]//Proceedings of the 2013 35th Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium. Las Vegas: IEEE, 2013:1-5.

[2] 胡冬青. 2012 年 IEEE 国际功率半导体器件(电力电子器件)及功率集成电路会议综述[J]. 电力电子, 2012, 12(5): 6-24.

HU D Q. Review of 2012 the 24th IEEE international symposium of power semiconductor devices and ICS [J]. Power Electronics, 2012, 12(5): 6-24.

[3] 崔建国, 宁永香. 基准电压源电路的设计与研究[J]. 电子世界, 2018(23): 145. (查阅所有网上资料,未找到对应的英文翻译,请联系作者补充)

[4] 毕查德·拉扎维. 模拟 CMOS 集成电路设计[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2013. (查阅所有网上资料,未找到对应的英文翻译,请联系作者补充)

[5] SANSENW M C. Analog design essentials[M]. Boston: Springer, 2006.

[6] SHUBIN V V. A New voltage level shifter for low-power applications [J]. Russian Microelectronics, 2019, 48 (5): 335-339. DOI: 10.1134/S1063739719040085.

[7] HOBRECHT S. An intelligent BiCMOS/DMOS quad 1-A high-side switch[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1990, 25 (6): 1395-1402. DOI: 10.1109/4.62167.

[8] 彭锐. 高压半桥驱动电路抗干扰分析与设计[D]. 合肥: 安徽大学, 2019.

PENG Rui. Anti-interference analysis and design of high voltage half-bridge driving circuit [D]. Hefei: Anhui University, 2019.

[9] 李阳. 一种高边功率开关的控制与驱动电路设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.

LI Yang. Design of control and driving circuits for high-side power switch[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.

作者简介:

智玉欣 男,(1993-),硕士研究生.研究方向为模拟集成电路设计. E-mail: zhiyuxin168@163.com.

蔡小五 男,(1979-),博士,研究员,博士生导师.研究方向为智能功率集成电路设计、功率器件 VDMOS 设计等.

赵海涛 男,(1983-),硕士,助理研究员.研究方向为智能功率集成电路设计.

夏瑞瑞 女,(1996-),博士.研究方向为智能功率集成电路.

刘海南 男,(1979-),硕士,副研究员.研究方向为集成电路的高可靠性设计技术.

罗家俊 男,(1973-),博士,研究员,博士生导师.研究方向为深亚微米集成电路低功耗设计技术、高性能深亚微米数模混合集成电路设计技术、智能功率集成电路设计技术等.

叶甜春 男,(1965-),研究员.研究方向为集成电路设计与应用、纳米加工与制造技术、新型器件.