

一种用于开关电源启动电路的新型自偏置 高压器件结构*

刘继芝[†] 陈星弼 李 定

(电子科技大学微电子与固体电子学院, 成都 610054)

摘要: 设计了一种新的用于离线式集成开关电源启动电路的自偏置高压器件结构. 对一个 RESURF 高压 (功率) 器件的此种自偏置方法进行了原理分析和仿真模拟. 采用该结构集成开关电源的启动电路可以节省芯片面积, 降低电路功耗, 易于控制且可提供较大的芯片内部电源电压.

关键词: 开关电源; 启动电路; 自偏置; 高压器件

EEACC: 2560P; 2570P

中图分类号: TN386

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)01-0132-05

1 引言

离线式集成开关电源自 20 世纪 90 年代中期间世以来, 显示出强大的生命力, 并以其优良特性倍受人们的青睐. 目前, 它已成为开发国际通用的高效率中、小功率开关电源的优选 IC, 被广泛应用于仪器仪表、笔记本电脑、移动电话 (手机)、电视机、VCD 和 DVD、摄像机、电池充电器、功率放大器等领域^[1].

离线式开关电源是将经过整流滤波的交流电源转换为各种需要的直流电源的一种普遍使用的电路. 通常在电路中, 转化和调制工作采用一个脉宽调制 (PWM) 控制集成电路来完成. 脉宽调制集成电路的最大工作电压为 30V. 开关电源需要一个电路在其工作时与整流滤波过的交流电源隔离. 这样的电路称为启动电路. 在开关电源电路启动时, 启动电路为整个开关电源电路提供偏置, 并对外接电容进行充电. 一旦开关电源电路开始工作, 由辅助电路给 PWM 控制集成电路提供电源, 并将启动电路关断.

在离线式集成开关电源的启动电路中, 一般都需要采用一个耐高压的管子来提供充电电流, 此高压管的偏置一般是由一个电阻或耗尽型的管子实现^[2~7]. 采用电阻方法的缺陷在于需要采用较大的电阻值来降低功耗, 这样将增加芯片的面积. 而采用耗尽型管子进行偏置的方法则存在着导致控制电路比较复杂的问题. 此外, 采用上面两种偏置方法的电路, 可以提供的芯片内部电源电压都比较小.

采用本文设计的自偏置高压器件结构开关电源

的启动电路可以在较小的面积下同时实现功耗小、控制电路简单且可提供较大芯片内部电源电压的目标. 本文首先对采用 RESURF 耐压技术构成的具有自偏置结构的器件进行分析, 并通过 MEDICI 软件模拟验证该器件的自偏置功能, 然后对该器件可提供芯片内部电源电压的范围进行原理分析及仿真; 再对该结构的控制方法进行讨论, 并对一个可用于开关电源的、输出电压高于 16V 才关断的简单高压启动电路进行仿真; 最后, 总结出本文提出结构的优点并得出结论.

2 器件工作原理及数值模拟结果

2.1 器件自偏置的原理及模拟结果

开关电源启动电路一般都需要一个电路为高压器件提供偏置. 本文提出的器件结构具有自偏置的功能, 而无需专门的偏置电路, 其结构示意图如图 1 所示. 图中虚线的左边, 是一个采用 RESURF 技术的无衬偏的高压 LDMOS^[8], 它的功能是将通过漏极 D 的高压电源的一部分转化为由源极 S 输出的低压电源, 为整个开关电源电路提供偏置电源, 并对外接电容进行充电, 也是电路中承受高压的部分. 在虚线的右边, 是器件的自偏置结构, 它是在 n 型外延层上做了一个 p-bias 区, 并将该 p 型区与栅极相连. 图中, 区代表 p-body 区和衬底之间的 n 型区域, 区代表 p-bias 区与衬底之间的 n 型区域. 在图 1 的右边是自偏置结构的等效电路图. 从图中可以看出: 自偏置结构可等效为一个 pn 结二极管 D,

*国家自然科学基金资助项目 (批准号: 60476036)

[†]通信作者. Email: jzhlou@uestc.edu.cn

2005-07-14 收到, 2005-09-05 定稿

C_T 是二极管的势垒电容, C_{ox} 是高压 LDMOS 的栅电容, 其中 V_x 是结构图中所示 x 点的电压.

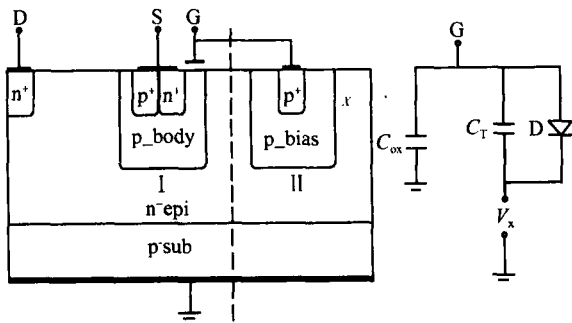


图 1 自偏置高压器件的剖面图

Fig. 1 Cross section of high voltage device of self-bias

为了简化器件自偏置原理的分析, 将上图中的与源极 S 相连的 n^+ 区由 p^+ 区代替, 使器件中没有电流流过. 该器件的工作过程, 可以根据自偏置结构

的三种工作状态分成三个阶段来进行分析, 且在分析过程中, 漏极 D 电压从 $0V$ 逐渐上升, 而源极 S 接地.

第一阶段: 器件的漏极电压从 $0V$ 开始逐渐增加, 整个 n 型外延层相对于 p 型衬底为正的高电位, pn 结反偏, n 型外延层耗尽了很小一部分, 大部分都保持电中性. 同时, p -body 区与 n 型外延层形成的 pn 结反偏, 但耗尽区并未扩展到 p -bias 区, 耗尽区的边界如图 2(a) 虚线所示. 此时, 电压 V_x 等于漏极电压, 由自偏置结构的等效电路图可以看出, 栅电极的电位跟随漏极电压变化, 其大小由势垒电容 C_T 和栅电容 C_{ox} 的比值决定, 如下式所示:

$$V_G = \frac{C_T}{C_{ox} + C_T} \times V_x \quad (1)$$

而势垒电容 C_T 和电压 V_x 与 V_G 之差有关, 且电压差越大, C_T 越小. 为了简化分析, 在漏极电压较小的情况下, 假定势垒电容 C_T 远远大于栅电容, 器件的栅极电压随漏极电压变化而变化, 且基本保持一致. 同时, 在此假设下, p -bias 区保持中性.

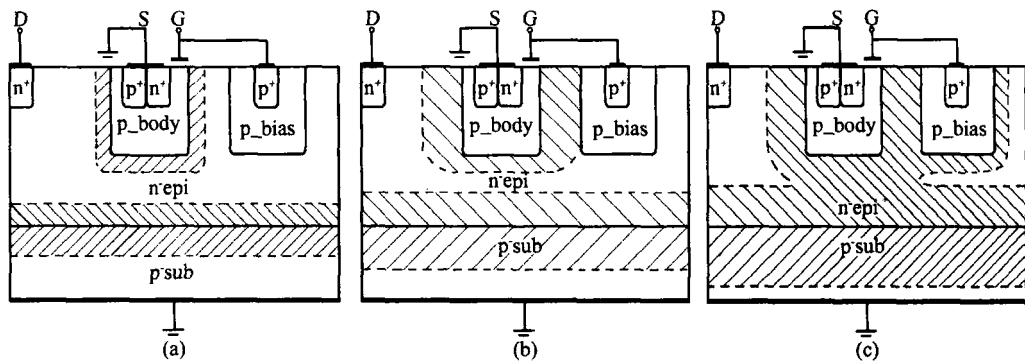


图 2 器件工作过程中三种状态耗尽层的变化情况

Fig. 2 Depletion region of the device during working

第二阶段: 随着漏极电压不断上升, 当 p -body 区与 n 型外延层形成的 pn 结反偏压大到使耗尽区扩展到 p -bias 区, 如图 2(b) 所示. p -bias 区中的空穴可在电场的作用下流入 p -body 区, 使 p -bias 区由中性变为带负电荷, 此负电荷分布在一个薄耗尽区内, 负电荷在表面产生的电场在主结到环的区域中与原电场方向相反. p -bias 区内侧的附加电场产生一个阻止空穴从环流向 p -body 区的势垒. 在这种情况下, 可以将自偏置结构看作是一个浮空场限环^[9], p -body 与 n 型外延层形成的 pn 结作为主结, 且主结与环之间的电压差为 V . 以下称 p -body 区与 n 型外延层形成的 pn 结为主结, p -bias 区为环. 当漏极电压继续增加, 主结电压等于漏极电压, 电压 V_x 等于漏极电压减去 V , 而栅极电压继续由公式 (1) 决定.

第三阶段: 漏极电压继续增加, 当 p -body 区的 n 型杂

质耗尽完之后, 漏极电压开始降在耐压区上, 而主结的反偏压达到最大值后不再增加, 其耗尽区的分布如图 2(c) 所示. 在这种情况下, 电压 V_x 不再变化, 器件的栅极电压也就保持不变.

上面的分析是假设器件没有电流的条件下进行的, 而在应用中要求器件有电流通过. 因此, 实际应用中, 器件的工作原理与上面的分析有一定差别. 在器件的栅电压小于阈值电压时, 器件的工作原理与上面分析中第一阶段的工作原理一样. 但当器件的栅源电压大于其阈值电压, 器件开启, 有电流从漏电极 D 流向源电极 S , 器件中电流流过的区域电荷分布都发生了改变. 在主结附近由于电子电流的存在, 该区域的正电荷减少, 主结的耗尽层在较小的漏极电压下就能达到环, 使得上面分析中的第二阶段工作状态在较小的漏压下提前达到. 而电流流过耐压区, 耐压区的电阻增加, 漏极电压大部分降在耐压区

上,主结的最大反偏压比上面分析的小很多.因此,实际应用中的栅极电压比没有电流情况下的小很多.同时,在栅极电压达到稳定之后,器件的 I 区保留有未耗尽的中性区.

从上面的分析可以看出,本文提出的高压器件具有自偏置的功能,且用于启动电路时,其漏极 D 可作为输入端,源极 S 可作为输出端,与自偏置结构相连的栅极 G 可作为控制端.

在开关电源应用中,当电路工作在 220V 交流电路中时,要求启动电路中的高压器件耐压大于 700V.因此本文中设定器件的耐压值为 800V,其耐压区采用 RESURF 技术,衬底浓度为 $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$,n 型外延层浓度为 $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$,厚度为 $20\mu\text{m}$.自偏置结构用 p-bias 区和做器件源衬底区的 p-body 区相同的 p 阱实现,其剂量为 $7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ [8].器件击穿特性曲线如图 3 所示,可以看出器件的击穿电压在 800V 左右.

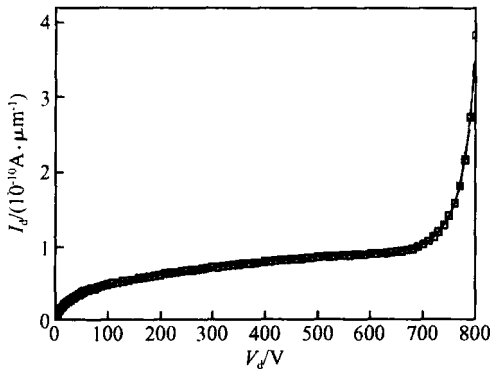


图 3 击穿特性曲线
Fig. 3 Breakdown curve

图 4 所示为器件的源极电流和栅极电压随漏极电压变化的情况.该模拟是在漏极电压从 0 变化到 400V,栅极浮空,源极接地的条件下进行的.从图中可以看出,在没有偏置电路的条件下,器件实现了自偏置的功能,且栅极电压在漏极电压为 100V 左右达到饱和,此后器件的源极电流随漏极电压的变化不大,源极电流也进入了饱和状态.

从上面的分析可知,本文提出的自偏置结构不但可以采用 RESURF 技术来实现,还可以采用其他耐压技术实现,例如横向变掺杂技术来实现[10].

2.2 器件可提供电源电压的范围及模拟结果

开关电源电路中的脉宽调制电路 PWM 的最大工作电压为 30V,因此希望启动电路可以提供的电源电压大于 30V.在采用本文提出器件的启动电路中,器件源极通过一个电容接地.电容两端的电压就是启动电路可提供的电源电压,因此要求器件源极电压大于 30V.在器件导通时,源极有电流流出对电

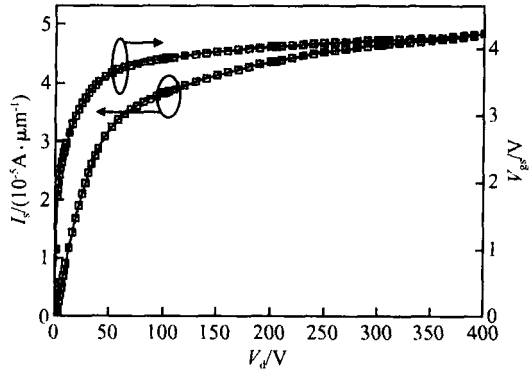


图 4 器件的源极电流和栅源电压随漏极电压的变化
Fig. 4 Source current and gate-source voltage versus drain voltage

容充电,源极电位上升,I 区电位随之上升,且上升的幅度相等.由场限环理论可知[9],p-bias 区的电位也上升相同的幅值,则器件的栅源电压保持不变,器件继续导通.当源极电压上升到使 I 区和 II 区的 n 型杂质全部耗尽,主结的反偏压保持不变,器件的栅极电压不再升高.如果源极电压继续上升,器件的栅源电压小于阈值电压,器件关断,对电容充电的过程结束,源极电压也停止上升.

因此,器件可提供电源电压的范围是由 I 区和 II 区 n 型杂质的剂量决定.在漏极电压 400V,栅极浮空的条件下,模拟栅源电压随源极电压变化的情况,如图 5 所示.从图中可以看出,当器件的源极电压小于 66V 时,栅源电压几乎不随源极电压变化;而当源极电压大于 66V 时,栅源电压迅速下降,很快就小于器件的阈值电压.因此,器件可提供的最大电源电压为 66V.

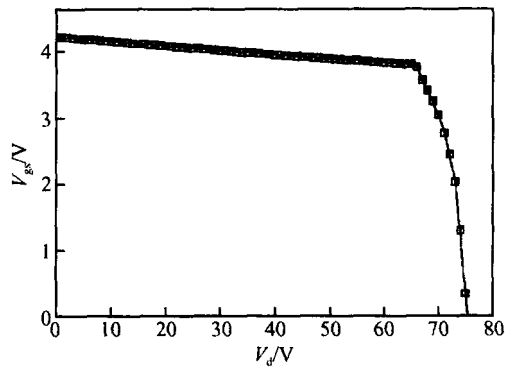


图 5 栅源电压随源极电压的变化
Fig. 5 V_{gs} versus V_s

2.3 器件的控制方法及模拟结果

本文提出的自偏置高压器件的控制方法非常简单.将器件的栅极与一个控制用 nMOSFET 的漏极相连,该 nMOSFET 的源极接地,栅极接控制信号,

通过控制 nMOSFET 就可以控制器件的开关. 当控制信号使 nMOSFET 关断时, 自偏置高压器件导通. 当控制信号使 nMOS 开启, 自偏置高压器件关断.

为了证明上面的控制方法, 对一个简单的开关电源可用的启动电路进行 MEDICI 软件的电路模拟, 电路示意图如图 6 所示. 图中虚线框内的器件 M1 为本文提出的自偏置高压器件. 器件 M2 是一个耐压为 50V, 开启电压为 16V 的 nMOSFET, 其作用是控制 M1 的开关. 二极管 D1 可以耐压 30V, 其作用是在电路的输入电压小于输出电压时, 防止电容放电, 并承受一定的压降.

电路的工作过程如下: 随输入电压的上升, M1 的栅电压上升到阈值电压, M1 开启, 有电流从 M1 的漏极流向源极, 并通过二极管 D1 对电容充电; 当电容电压达到 16V 时, 控制管 M2 开启, 将 M1 的栅电压钳位在 0V, M1 关断, 充电过程结束, 输出电压保持 16V 不变.

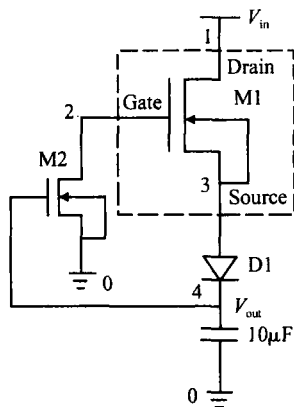


图 6 一个简单的开关电源可用的启动电路

Fig. 6 A sample start-up circuit for switching model power supply

在仿真中, 设 M1 的沟道宽度为 $30\mu\text{m}$, M2 的沟道宽度为 $3\mu\text{m}$. 图 7 所示为电路的输入端电压、输出端电压和输出端电流随时间的变化情况. 从图中可以看出: 在整个工作过程中, 该启动电路的输出电压能够达到 16V, 且输出电压一旦达到 16V 后就不再随输入电压变化. 该电路的最大输出电流为 1.4mA, 在整个周期内的功耗为 5mW.

上面模拟所用的电路, 是为了证明本文提出的结构的控制方法而构造的一个简单电路, 并不一定适用于实际的开关电源电路. 实际的开关电源的启动电路的控制方法是比较复杂的, 需要根据整个电路的要求来设计.

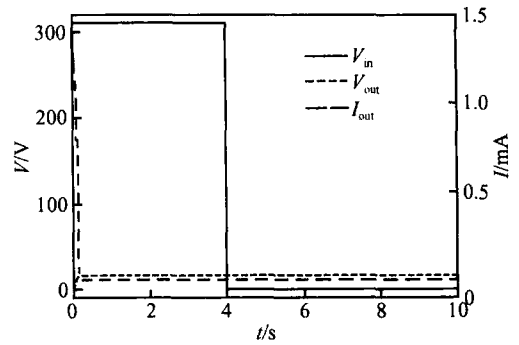


图 7 输入电压、输出电压和输出电流随时间的变化过程
Fig. 7 Input voltage, output voltage, and output current versus time

3 结论

本文提出了一种自偏置高压器件结构, 并对一个 RESURF 高压器件的此种自偏置方法进行了分析及仿真. 通过仿真得到该器件的耐压为 800V, 具有自偏置的功能, 可提供的最大电源电压为 66V, 并可以采用 NMOS 进行控制. 通过仿真结果可知, 采用该结构集成开关电源的启动电路可以节省芯片面积, 降低电路功耗, 易于控制, 且可提供较大的芯片内部电源电压. 同时, 该结构也可以采用其他的耐压技术实现.

参考文献

- [1] Sha Zhanyou. The design and application of the novel switching model power supply. Beijing: The Publishing House of Electronics Industry, 2001 (in Chinese) [沙占友. 新型单片开关电源的设计与应用. 北京: 电子工业出版社, 2001]
- [2] Balakrishnan B. Self powering technique for integrated switched power supply. US Patent 5014178, 1991
- [3] Lei J, Jose S. High voltage start-up circuit and method therefore. US Patent 5640317, 1997
- [4] Lei J, Jose S. High voltage start-up circuit and method therefore. US Patent 5815383, 1998
- [5] Balakrishnan B. Switched mode power supply integrated circuit with start-up self-biasing. US Patent 5285369, 1994
- [6] Tisinger E W, Okada D M. Off-line bootstrap startup circuit. US Patent 5477175, 1995
- [7] Hallberstadt J C. On chip current source. US Patent 6504352 B2, 2003
- [8] Chen Xingbi. Power MOSFET and high voltage integrated circuit. Nanjing: The Publishing Company of the Southeast University, 1989 (in Chinese) [陈星弼. 功率 MOSFET 与高压集成电路. 南京: 东南大学出版社, 1989]
- [9] Chen Xingbi. A simple theory of floating field limiting rings. Acta Electronica Sinica, 1988, 16(3): 6 (in Chinese) [陈星弼. 场限环的简单理论. 电子学报, 1988, 16(3): 6]
- [10] Sze S M, Gibbons G. Avalanche breakdown voltages of abrupt and linearly graded p-n junctions in Ge, Si, GaAs, and GaP. Appl Phys Lett, 1966, 8: 111

A Novel Self-Bias High-Voltage Device Structure for Start-Up Circuit of Off-Line Switching Model Power Supply IC*

Liu Jizhi[†], Chen Xingbi, and Li Ding

(School of Microelectronics and Solid-State Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract : A novel self-bias high-voltage device structure for the start-up circuit of an off-line switching model power supply IC is described. The structure and properties of the device, made by RESURF technology, are analyzed and simulated. Using this novel start-up circuit structure for the off-line switching model power supply IC can save the cell area, reduce the power consumption of the circuit, and easily control and supply the larger output voltage.

Key words : switching model power supply; start-up circuit; self-bias; high-voltage device

EEACC : 2560P; 2570P

Article ID : 0253-4177(2006)01-0132-05

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60476036)

[†] Corresponding author. Email: jzhliu@uestc.edu.cn

Received 14 July 2005, revised manuscript received 5 September 2005