

МОП-ключ с малым значением падения напряжения при малом токе утечки

Руслан ДОМБРОВСКИЙ
Александр ОДНОЛЬКО
Михаил ПАВЛЮК
Александр СЕРЕБРЯКОВ
info@milandr.ru

Сегодня в мире электроники представлено огромное число разнообразных аналоговых ключей, реализованных на МОП-транзисторах. С момента появления их первых версий было создано множество специализированных схем. Современная электроника движется по пути увеличения скорости, а следовательно, и уменьшения размерности элементов интегральных схем. Это влечет за собой некоторые сложности, которые стоят перед разработчиком [1].

В системах с низким напряжением питания и током потребления основная сложность разработки современного ключа заключается в двух нежелательных явлениях — утечка закрытого ключа и падение напряжения на открытом. Преодолеть эти затруднения легче с помощью полевых транзисторов, поскольку у них есть преимущества перед ключами на биполярных транзисторах: малое сопротивление в открытом состоянии, высокое сопротивление в закрытом состоянии, незначительная мощность, потребляемая от источника управляющего сигнала. На рис. 1 изображены классические схемы построения аналоговых ключей на МОП-транзисторах. Верхний уровень напряжения на затворе $U_{упр}$ является открывающим для таких структур; при подаче нижнего уровня $U_{упр}$ транзисторы закрыты.

Архитектура, представленная на рис. 1а, представляет собой простейший вариант построения ключа, но для коммутации напряжений во всем диапазоне напряжений питания требует дополнительной схемы, создающей повышенное напряжение на затворе в от-

крытом состоянии. Комплементарная пара (рис. 1б) обладает некоторыми отличиями в сравнении с первой архитектурой: при параллельном соединении p - и n -канальных транзисторов сопротивление в открытом состоянии ($R_{вх}$) меньше зависит от входного напряжения, если пренебречь влиянием температуры, напряжения питания, а также зависимостью сопротивления в открытом состоянии от входного аналогового напряжения. Третья архитектура (рис. 1в) имеет напряжение на кармане, зависимое от состояния коммутации, что позволяет снизить ток утечки, но повысить входное сопротивление в открытом состоянии, а значит, и напряжение падения на ключе. В идеале следует стремиться к минимизации сопротивления ($R_{вх}$) и тока утечки ($I_{ут}$), что поможет сократить потери в ключе и задержку распространения сигнала. Простое уменьшение $R_{вх}$ реализуется изменением отношения ширины (W) к длине (L) канала МОП-транзистора, что, в свою очередь, приведет к росту тока утечки закрытого состояния и паразитных емкостей, сужающих рабочую полосу частот ключа [2, 3].

На рис. 2 представлена архитектура предлагаемого ключа. Ключ построен на основе схемы параллельно включенных p - и n -канальных МОП-транзисторов с управляемыми карманами посредством инверторов (VT3–VT4, VT5–VT6) с использованием источников тока (I_1 , I_2).

На рис. 3 представлена структура p - и n -канальных полевых транзисторов с токами, поясняющими принцип работы схемы, показанной на рис. 2. Главная задача схемы — обеспечить высокую проводимость транзисторов в открытом состоянии и низкую в закрытом. Это осуществляется инвертором Инв.1 на транзисторах VT3 и VT4 с источником тока I_1 для транзистора VT1 и инвертором Инв.2 на транзисторах VT5 и VT6 с источником тока I_2 для транзистора VT2. Принцип работы левой части схемы диаметрально противоположен правой за исключением тока коммутации и представляет собой следующее. В открытом состоянии на затворе p -канального транзистора VT1 (рис. 3а) формируется напряжение низкого уровня. Одновременно с этим напряжение

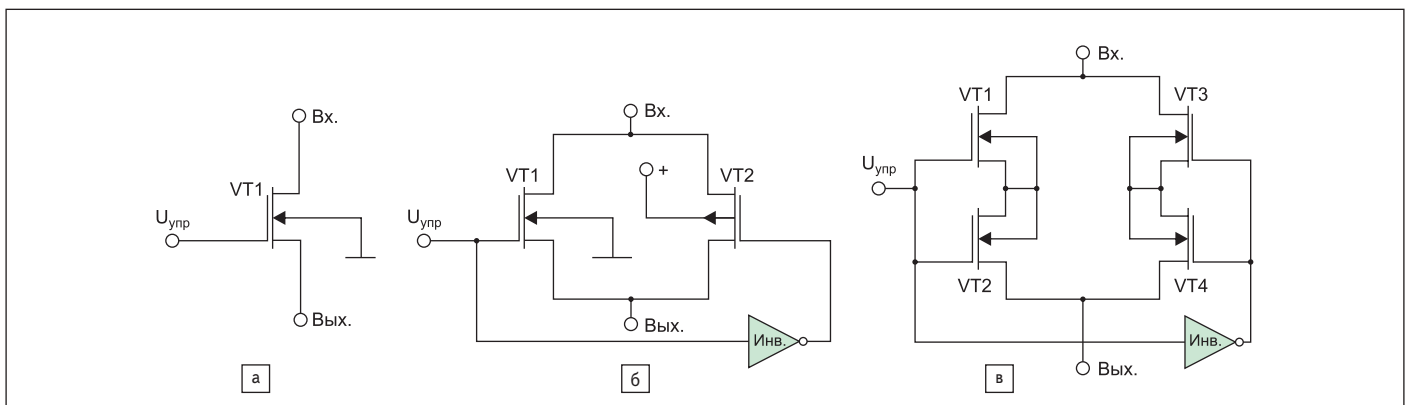


Рис. 1. Классические архитектуры аналоговых МОП-ключей:

а) ключ на одном транзисторе; б) ключ с использованием комплементарной пары транзисторов; в) ключ с «плавающим карманом»

на входе инвертора Инв.1 (рис. 2) имеет высокий уровень. Транзистор VT4 переходит в открытое состояние, таким образом появляется ток источника I1, приложенный к выводу кармана транзистора (рис. 3) и дополнительно повышающий проводимость. Высокая проводимость обеспечивается смещением напряжения кармана ($U_{карм.}$) относительно напряжения стока (U_c), истока (U_n). При этом выполняются следующие условия:

$$U_{карм.} < (U_c, U_n), U_{вх} > U_{вых}, \\ i.I1' \gg i.I1'', i.I1' \approx I.$$

В закрытом состоянии ключа, при формировании напряжения высокого уровня на затворе транзистора VT1, инвертор Инв.1 формирует напряжение высокого уровня, тем самым переводя транзистор VT4 в закрытое состояние и ограничивая ток I1, а транзистор VT3 — в открытое состояние, что снижает проводимость VT1 и уменьшает ток утечки в закрытом состоянии. Предложенная архитектура не может быть использована в технологиях с неизолированным *n*-канальным транзистором.

В таблице приведены сравнения основных параметров представленных ключей по результатам моделирования в среде Cadence на моделях транзисторов TSMC 40 нм. Сравнимые ключи моделировались при одинаковых условиях, общим признаком сравнения была площадь. Общий размер каждого ключа составлял 2000 мкм ширины к 600 нм длины, при равных размерах транзисторов *p*- и *n*-типов проводимости. Напряжение питания составляет 3,3 В,

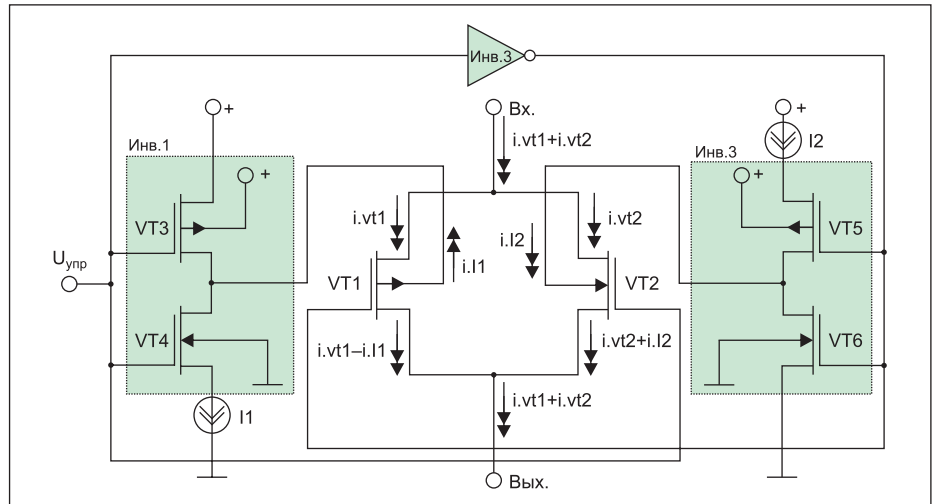


Рис. 2. Аналоговый ключ с управляемым карманом

ток нагрузки в открытом состоянии задан 10 мА. Токи $I1 = I2$, эффект снижения проводимости наступает при токах более 10 нА.

Из таблицы видно, что при использовании всей доступной площади простейший ключ (рис. 1а) имеет наименьшее входное сопротивление при малом $U_{вх}$, но при этом наибольший ток утечки в закрытом состоянии. В случае если входное напряжение равно управляющему, сопротивление ключа достигает 116 Ом, при условии $U_{вх} = U_{вх}$ применять данный ключ нецелесообразно. Комплементарная пара (рис. 1б) решает проблему ключа на одном *n*-канальном транзисторе, также возможно уменьшить ток утечки. Комплементарный ключ с «плавающим карманом» (рис. 1в) имеет малый ток

утечки закрытого состояния, входное сопротивление в таком включении значительно увеличится в сравнении с комплементарной парой. Предложенная архитектура ключа с управляемым карманом (рис. 2), построенная на основе комплементарной пары, основывается на ее свойствах (рис. 1б), но обладает меньшим сопротивлением и меньшим током утечки в закрытом состоянии.

Предложенная архитектура отличается преимуществами, позволяющими использовать ее в быстродействующих системах с низким напряжением питания и высокими требованиями к току потребления. Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки России (Соглашение № 14.576.21.0064 от 06.11.2014 г.).

Таблица. Сравнения основных параметров представленных аналоговых ключей

Параметр	$U_{вх}$, В	Простейший ключ на одном транзисторе (рис. 1а)	Комплементарная пара (рис. 1б)	Комплементарный ключ с «плавающим карманом» (рис. 1в)	Предложенная архитектура ключа с управляемым карманом (рис. 2)
Сопротивление в открытом состоянии $R_{вх}$, Ом	3,3	116,4	6,3	25,7	5,7
	2	4,6	5,3	11,2	2,3
	1,5	1,2	2,4	8	1,7
Ток утечки в закрытом состоянии $I_{ут}$, нА	3,3	1,3	0,69	1,1	0,69
	2	0,34	0,17	0,21	0,17
	1,5	0,29	0,12	0,06	0,12

Литература

1. Munir U., Canny D. Selecting the Right CMOS Analog Switch. Elektronikpraxis, 2012.
2. Волович Г. И. Аналоговые коммутаторы // Схемотехника. 2001. № 5.
3. Бабаян Р. Р. Аналоговые коммутаторы и ключи / Труды конференция «Технические и программные средства систем управления, контроля измерений». Москва, 2010.

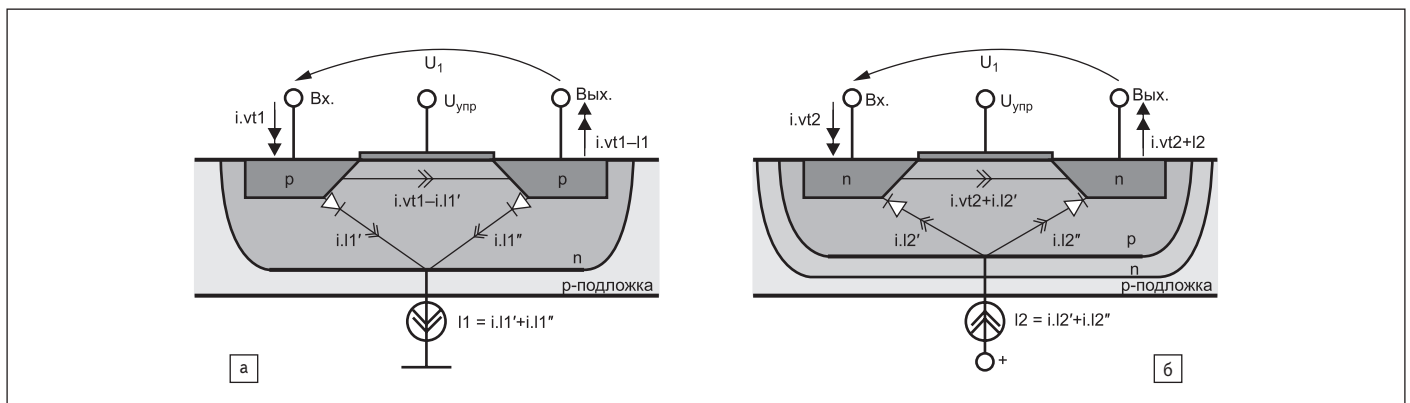


Рис. 3. Структура полевого транзистора, демонстрирующая токи схемы рис. 2: а) для *n*-канального; б) *p*-канального типа проводимости